



**João Pedro Pereira Neves**

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

## **Estudo da Agregação da Flexibilidade em Habitações – O Frigorífico como Caso de Estudo**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutor João Francisco Alves Martins,  
FCT/UNL

Co-orientador: Mestre Rui Miguel Amaral Lopes, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Professor Doutor Tiago Oliveira Machado de Figueiredo Cardoso

Arguente: Professor Doutor João Miguel Murta Pina



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro 2016**



## **Estudo da Agregação da Flexibilidade em Habitações – O Frigorífico como Caso de Estudo**

Copyright © João Pedro Pereira Neves, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*Aos meus Pais, Irmã, Avó, Namorada e Amigos.*



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de expressar o meu agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor João Martins, e ao meu co-orientador, Mestre Rui Lopes, por todo o ensinamento, ajuda, disponibilidade e orientação ao longo deste ano.

Gostaria também de agradecer as bolsas de estudo que a Direção Geral do Ensino Superior e a Câmara Municipal de Almeirim me proporcionaram ao longo do curso, foram uma grande ajuda financeira.

A todos os presentes no grande grupo e equipa que é o NEEC, no qual tive a oportunidade de fazer parte. Um obrigado aos meus amigos e colegas de equipa José Araújo e Pedro Sá, pela aprendizagem, crescimento e ajuda. Obrigado Adriana Mar e Fábio Januário, por estarem sempre presentes com a vossa ajuda, opinião, conhecimento e acima de tudo amizade e companheirismo. Aos Fac Bros, Ruben Costa, Daniel Pestana, Manuel Pereira e Vasco Ferreira por termos construído uma amizade em cima de ajuda, aprendizagem, partilha de conhecimento e sempre com companheirismo, superando os diversos desafios que encontramos dentro e fora deste curso.

Um obrigado especial a todos os meus amigos de infância que me acompanharam até agora, Francisca Féria, Pedro Rodrigues, João Magalhães, Vasco Ferreira, Diogo Coelho, David Pires, Rita Ferreira, Mariana Apolónia, Eduardo Oliveira, entre outros.

Aos meus pais pelo suporte incondicional, amor e carinho, acima de tudo um sincero obrigado pelas oportunidades que sempre me proporcionaram ao longo de toda a minha vida que me permitiram ser o que sou hoje, tudo se deve aos excelentes pais que são e aos valores e educação que me dão. À minha irmã, Carolina, pelo seu carinho e amor. À minha Avó Zalina, por ser uma segunda mãe, pelo seu apoio, ajuda, ensinamentos, educação, amor e carinho.

Por último, gostaria de agradecer profundamente a uma das pessoas mais importantes na minha vida, a minha namorada, a minha melhor amiga, Adriana! Todo o apoio, motivação, conhecimento, dedicação, paciência, amor e amizade foram cruciais para o culminar da realização deste trabalho e da minha aprendizagem ao longo de toda esta fase, bem como do meu crescimento pessoal. Obrigado!





## **RESUMO**

A geração de energia elétrica é atualmente uma das maiores causas de emissões de CO<sub>2</sub>, sendo um sector onde estão concentrados esforços para a contrariar essa tendência. Paralelamente, a procura de energia à escala global tem uma tendência crescente, estando previsto que entre 2015-2030 tenha um aumento superior a 40%. Posto isto, é necessário encontrar soluções para acompanhar a necessidade de produção de forma sustentável a curto, médio e longo prazo. É nesse sentido que se verifica a introdução de fontes de energia renovável na rede elétrica como fontes de geração, sendo uma possível solução para mitigar os efeitos da poluição associada à produção de energia através de fontes convencionais (combustíveis fósseis). Contudo, os seus perfis de produção são difíceis de prever e nem sempre estão de acordo com a relação produção-consumo presente na rede, tornando-se necessário recorrer às fontes convencionais de forma a resolver os possíveis problemas que existam na rede. Com o intuito de minimizar a utilização de fontes não sustentáveis, a participação ativa do consumidor na rede elétrica pode ser parte de uma solução mais abrangente. Como exemplo, refira-se a alteração dos perfis de consumo nas habitações, alterando o funcionamento dos equipamentos. No entanto, é necessário conhecer durante quanto tempo podem ser feitas essas alterações e como influenciam o consumo (i.e., quão energeticamente flexíveis são os equipamentos).

Desta forma, nesta dissertação é desenvolvida uma metodologia de cálculo da flexibilidade energética em habitações, aplicada ao caso concreto do frigorífico doméstico. A metodologia permite obter informações relativas à previsão da flexibilidade energética de um agregado destes equipamentos, nomeadamente, a duração de flexibilidade e a correspondente potência disponível, em cada instante ao longo de um período de simulação definido. Nos testes realizados resultou que um agregado de 4 milhões de frigoríficos distintos pode oferecer cerca de 48 minutos de duração de flexibilidade no máximo, e um máximo de 80 MW de potência disponível em determinados instantes.

**Termos Chave:** Flexibilidade Energética; Energia Renovável; Interação com a rede elétrica.



# **ABSTRACT**

The production of electrical energy it is nowadays one of the major causes of the CO<sub>2</sub> emissions, being a sector where the efforts are concentrated to counteract that trend. At the same time, the global energy demand has a growing trend and is expected to have, between 2015-2030, an increase of 40%. Hereupon, it is necessary to find solutions that are capable of follow the need for production in a sustainable way in a short, medium and long term. And that's why the renewable energy sources are being introduced in the electric grid, being part of a possible solution to mitigate the effects of the pollution associated with the production of energy from fossil fuels. However, their production profiles are difficult to predict and not always are according with the production-consumption ratio present on the electric grid, becoming necessary to resort the conventional sources as way to solve the possible problems that exist on the electric grid. Therefore, in order to minimize the utilization of non-sustainable sources, the active participation of the demand side of the gird, through the consumer, could be part of a possible solution. For example, through the changing of the consumption profile of households, changing the operation of the domestic equipments. However, it's necessary to know how long those changes can be made and how they influence the consumption (i.e. to know how much energy flexible the equipments are).

Thus, in this thesis is developed an energy flexibility calculation methodology in homes, applied to the case of the domestic refrigerator. This methodology can give a prediction of the energy flexibility of set of equipments, in particular, the flexibility duration and the associated available power, at each instant over a defined period of simulation. With the realized tests it resulted that a set of 4 million different refrigerators could provide about a maximum of 48 minutes of flexibility duration and a maximum of 80 MW of available power at certain times.

Keywords: Energy Flexibility; Renewable Energy; Interaction with the electric grid.



# ÍNDICE DE MATÉRIAS

1.	Introdução .....	1
1.1.	Enquadramento e Motivação .....	1
1.2.	Objetivos.....	3
1.3.	Estrutura do documento .....	3
2.	Flexibilidade .....	5
2.1.	Definição Geral de Flexibilidade Energética .....	5
2.2.	Indicadores de Flexibilidade.....	6
2.2.1.	Quantificação da Flexibilidade Sem Ter em Conta Custos Energéticos e/ou Monetários.....	6
2.2.2.	Quantificação da Flexibilidade Tendo em Conta os Custos Energéticos e/ou Monetários.....	10
2.3.	Aplicações da Flexibilidade Energética.....	19
3.	Aproveitamento da Flexibilidade Energética de Frigoríficos.....	23
3.1.	Funcionamento do Frigorífico .....	23
3.2.	Modelo Utilizado.....	26
3.3.	Validação do Modelo do Frigorífico.....	28
3.4.	Medição da Flexibilidade Energética .....	29
3.4.1.	Individual .....	30
3.4.2.	Agregada .....	33
3.4.3.	Método de Cálculo .....	33
4.	Resultados e Análise.....	35
4.1.	Caso de Estudo .....	35
4.2.	Flexibilidade Individual .....	38
4.3.	Flexibilidade Agregada.....	41
4.3.1.	Análise da Duração de Flexibilidade.....	41
4.3.2.	Análise da Flexibilidade.....	46
5.	Conclusões e Trabalhos Futuros .....	51
5.1.	Síntese Geral e Contribuições .....	51
5.2.	Trabalhos Futuros .....	53
5.3.	Artigos Publicados.....	53
	Bibliografia.....	55



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Crescimento da procura de eletricidade e a relação com as emissões de CO <sub>2</sub> desde 1990 (esquerda) e as emissões de CO <sub>2</sub> por região (direita).....	1
Figura 2.1 – Esquema do cálculo do potencial de flexibilidade para aumento (esquerda) e diminuição de potência (direita) .....	8
Figura 2.2 - Exemplo de um perfil de flexibilidade combinado de diversos dispositivos .....	8
Figura 2.3 – Representação do funcionamento do sistema atrasado (esquerda) e forçado/adiantado (direito) .....	10
Figura 2.4 – Curvas de custo sem pontos intermédios (esquerda) e com pontos intermédios (direita) .....	11
Figura 2.5 – Exemplo da representação da flexibilidade .....	12
Figura 2.6 – Representação de alternativas na modificação do sinal de potência .....	13
Figura 2.7 – Matriz das elasticidades do preço nas várias estações do ano .....	15
Figura 2.8 – Alteração absoluta da potência elétrica utilizada para um decréscimo do preço de 1% para cada hora .....	16
Figura 2.9 – Perfil de potência elétrica utilizada para uma redução do preço de -30% nas horas 7 e 15 .....	17
Figura 2.10 – Eficiência para o aumento de potência.....	18
Figura 2.11 – Eficiência para a diminuição de potência .....	19
Figura 3.1 – Componentes constituintes do frigorífico.....	24
Figura 3.2 – Esquema do ciclo de refrigeração por compressão de vapor .....	25
Figura 3.3 – Simulação da variação da temperatura interna do frigorífico e do funcionamento do compressor de acordo com essa variação, ao longo de 12 horas. ....	27
Figura 3.4 – Simulação da variação da temperatura interna de 3 frigoríficos ao longo de 12 horas. ....	28
Figura 3.5 – Variação da temperatura interna real e modelada ao longo de 19 horas e 36 minutos (1176 minutos).....	29
Figura 3.6 – Cálculo da flexibilidade no frigorífico – Caso 1.....	31
Figura 3.7 – Cálculo da flexibilidade no frigorífico – Caso 2.....	32
Figura 3.8 – Esquema ilustrativo da metodologia desenvolvida para o cálculo da flexibilidade energética.....	34

Figura 4.1 – Flexibilidade de um frigorífico desligado num instante inicial da fase de arrefecimento.....	38
Figura 4.2 – Flexibilidade de um frigorífico desligado num instante final da fase de arrefecimento.....	39
Figura 4.3 – Flexibilidade de um frigorífico desligado num instante da fase de arrefecimento. .	40
Figura 4.4 – Duração da flexibilidade correspondente a cada instante onde o frigorífico pode ser desligado. ....	41
Figura 4.5 – Duração da flexibilidade para 6 frigoríficos desligados próximo do instante do limite de temperatura mínima. ....	42
Figura 4.6 – Duração da flexibilidade para 6 frigoríficos, desligados no instante do limite de temperatura máxima.....	42
Figura 4.7 – Duração da flexibilidade para 6 frigoríficos, desligados num instante intermédio da fase de arrefecimento.....	43
Figura 4.8 – Duração da flexibilidade para 6 frigoríficos, com estado inicial do compressor aleatório no instante onde são desligados. ....	44
Figura 4.9 – Duração da flexibilidade para 6 frigoríficos, com temperatura inicial e estado inicial do compressor aleatórios. ....	45
Figura 4.10 – Duração da flexibilidade para 4 milhões de frigoríficos, com temperatura inicial e estado inicial do compressor aleatórios. ....	45
Figura 4.11 – Flexibilidade prevista de 4 milhões de frigoríficos a serem desligados em todos os instante a partir de instante inicial do período de simulação. Considerando que a flexibilidade não é usada. ....	47
Figura 4.12 – Flexibilidade prevista de 4 milhões de frigoríficos a serem desligados em todos os instante a partir de instante inicial do período de simulação, considerando que a flexibilidade não é usada. A potência de cada frigorífico é aleatória entre 70 W e 140 W. ....	48
Figura 4.13 – Flexibilidade prevista de 4 milhões de frigoríficos a serem desligados em todos os instantes a partir de instante inicial do período de simulação, considerando que a flexibilidade não é usada. A potência de cada frigorífico é aleatória entre, bem como a massa térmica. ....	49



## **ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 3.1 – Valor dos parâmetros necessários à implementação do modelo da equação (3.1). .....	27
Tabela 3.2 – Parâmetros do modelo da equação (3.1) utilizados na simulação presente na Figura 3.5 .....	29
Tabela 4.1 – Parâmetros do modelo do frigorífico nas simulações do subcapítulo 4.2. ....	36
Tabela 4.2 – Parâmetros do modelo do frigorífico nas simulações com 6 e 4 milhões de frigoríficos do subcapítulo 4.3.1. ....	37
Tabela 4.3 – Parâmetros do modelo do frigorífico nas simulações com 4 milhões de frigoríficos do subcapítulo 4.3.2. ....	37



## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

°C	Grau Celsius
AD	<i>Active Demand</i>
DR	<i>Demand Response</i>
DSM	<i>Demand Side Management</i>
W	Watt
Wh	Watt-hora



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

No âmbito desta dissertação, o presente capítulo expõe o enquadramento e a motivação da mesma. Em seguida são apresentados os objetivos e a estrutura do documento.

### 1.1. Enquadramento e Motivação

No cenário mundial atual é urgente reduzir as emissões de gases com efeito de estufa de forma a contrariar as alterações climáticas resultantes do uso de combustíveis fósseis na produção de energia elétrica. Foram então definidas metas mundiais, a atingir em curto-médio prazo (entre os anos 2020 e 2030) [1], para as emissões de gases com efeito de estufa de forma a incentivar os países a implementarem medidas que atuem no sentido da redução das referidas emissões (Figura 1.1); nomeadamente através de investimento em formas sustentáveis de produção de energia [2].

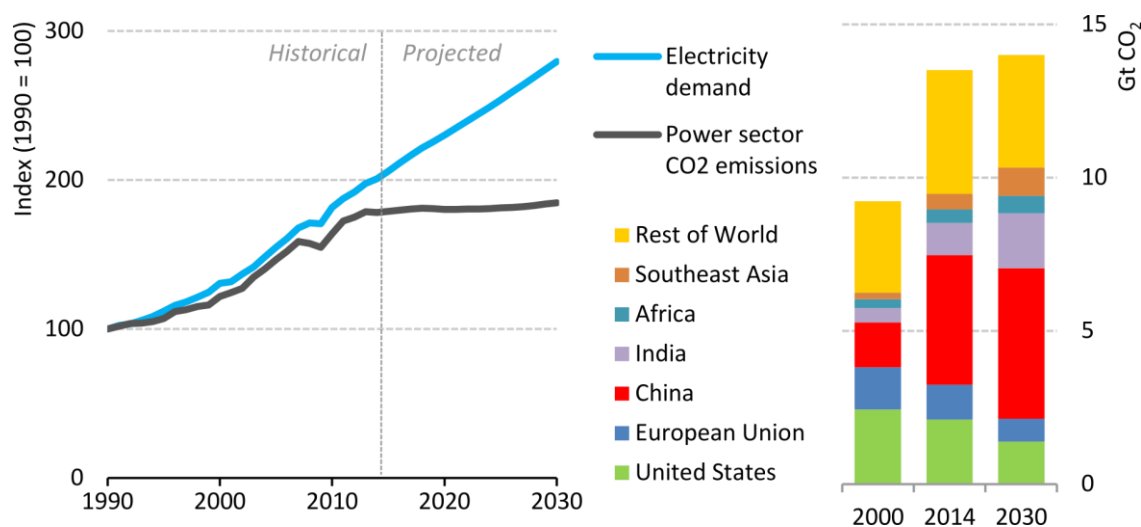


Figura 1.1 – Crescimento da procura de eletricidade e a relação com as emissões de CO<sub>2</sub> desde 1990 (esquerda) e as emissões de CO<sub>2</sub> por região (direita) [3].

No período entre o ano de 2004 e 2013, a produção de energia renovável como fonte primária de energia na Europa aumentou cerca de 72,5%, e em Portugal no ano de 2013 97.5% da energia produzida foi proveniente de fontes renováveis [4]. A tendência crescente da inclusão de fontes de energia renovável na rede acarreta a necessidade de adaptar os sistemas elétricos de acordo com o perfil de produção variável característico desse tipo de fontes, onde nem sempre a relação produção-consumo está de acordo com as exigências de estabilidade da rede. Por norma esses problemas são resolvidos através da produção de energia proveniente de combustíveis fósseis. Não sendo esta uma solução na direção da sustentabilidade energética, surge a necessidade de encontrar alternativas. Ou seja, será necessário que o sistema elétrico disponha de serviços auxiliares de reserva que possam fornecer reservas de resposta, imediata e de curta duração, à rede evitando assim a necessidade da introdução de novas fontes de produção baseadas em combustíveis fósseis. Essencialmente pretende-se que esses recursos sejam provenientes de cargas que já se encontrem em funcionamento e síncronas com a rede, sendo esta uma solução mais eficiente. O deslocamento de cargas é uma forma de harmonizar a relação entre a produção e o consumo, como meio de colmatar os erros de previsão da produção proveniente das fontes renováveis [5].

A utilização da flexibilidade energética através dos dispositivos elétricos que estão presentes nas habitações (e.g. máquinas de lavar, frigoríficos, máquinas de secar, ar-condicionado, termoacumuladores), no lado do consumidor, poderá ser uma solução. Heffener et al. elaborou um estudo com base nos serviços de reserva, no qual pôde concluir que a utilização dos serviços de reservas provenientes de cargas é economicamente viável em relação à utilização de fontes convencionais [6].

No Reino Unido está previsto que o aglomerado de sistemas elétricos flexíveis nas habitações (e.g. Sistemas de Aquecimento de Água e de Espaço, *Cold Appliances* (frigoríficos/congeladores) e *Wet Appliances* (máquinas de lavar/secar roupa, máquinas de lavar loiça)) represente um total de 68,2 TWh de consumo flexível no ano 2030 (contudo este valor varia consoante a altura do dia, semana e até estação do ano, em função do padrão de ocupação das habitações e aos diferentes hábitos de uso de cada dispositivo) [7]. Em Portugal, no ano 2004, os equipamentos de frio doméstico (frigoríficos, combinados e congeladores) representavam cerca de 32% do consumo de energia elétrica por uso final [8], e em 2010 o número estimado desses equipamentos nas habitações nacionais superava os 4 milhões [9]. Com base na situação retratada, o frigorífico é um eletrodoméstico que tem uma forte presença nas habitações, além disso o seu perfil de consumo cíclico e o elevado potencial de armazenamento térmico de energia tornam este um bom sistema para o estudo da flexibilidade energética. A sua capacidade de armazenamento de energia térmica permite que possa ser desligado durante um curto período de tempo e todo o processo é praticamente insensível na ótica do utilizador, existindo um baixo impacto sobre as suas condições de funcionamento [10].

Torna-se então necessário estudar uma forma de modelar o funcionamento do frigorífico, bem como uma forma de introduzir e quantificar no seu funcionamento o conceito de flexibi-

lidade energética. A flexibilidade introduzida por um só frigorífico poderá ser insignificante tendo em conta as necessidades da rede elétrica, sendo assim necessário o estudo da flexibilidade oferecida por um agregado de frigoríficos ao nível de uma determinada região ou até de todo o país.

## 1.2. Objetivos

O objetivo principal da presente dissertação consiste no desenvolvimento de uma metodologia para o cálculo da flexibilidade energética, oferecida por dispositivos presentes em habitações, aplicada ao caso concreto do frigorífico. A metodologia desenvolvida efetua o cálculo da flexibilidade energética disponível em cada dispositivo considerado, bem como daquela oferecida por um conjunto de dispositivos.

Para o desenvolvimento da metodologia é necessária a compreensão do funcionamento do frigorífico e a sua respetiva modelação, de modo a obter uma representação do comportamento da temperatura interna do mesmo. Através do modelo é efetuado o cálculo da flexibilidade energética, que mostra a flexibilidade disponível em cada frigorífico e em cada instante.

O caso de estudo, o frigorífico, foi selecionado com base na repartição do consumo de energia em Portugal em 2002, onde 22% do consumo é relativo a este dispositivo [8], e tendo em conta que existem aproximadamente 4 000 000 de frigoríficos em Portugal, com base num estudo estatístico do ano de 2010 [9]. Estes dois fatores tornam interessante analisar e quantificar a flexibilidade energética que este dispositivo, de forma aglomerada, pode oferecer à rede.

## 1.3. Estrutura do documento

O presente documento é redigido na língua portuguesa, como tal alguns anglicismos de uso corrente serão utilizados, sendo estes apresentados em *itálico*. A estrutura é composta por 5 capítulos, incluindo o presente capítulo introdutório, sendo que os restantes se estruturam da seguinte forma:

- **Capítulo 2 – Flexibilidade**

Este capítulo engloba uma revisão da literatura do conceito de flexibilidade energética e dos métodos de quantificação da flexibilidade. Além disto, foi elaborada também uma revisão das aplicações da flexibilidade energética.

- **Capítulo 3 – Aproveitamento da Flexibilidade Energética de Frigoríficos**

O terceiro capítulo inclui o estudo do funcionamento e comportamento do frigorífico. É ainda apresentado o modelo matemático utilizado para modelar o funcionamento da temperatura interna do frigorífico e o estado do compressor, bem como a validação do mesmo. Neste

capítulo é ainda apresentado o método desenvolvido para o cálculo da flexibilidade energética tanto a nível individual como agregado.

- **Capítulo 4 – Resultados e Análise**

Neste capítulo é apresentado o caso de estudo, as simulações elaboradas tanto para a flexibilidade individual e agregada e a análise dos resultados provenientes das mesmas.

- **Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos Futuros**

O último capítulo conclui sobre o trabalho elaborado e a análise dos resultados obtidos, menciona ainda quais as contribuições do estudo desenvolvido, e refere os possíveis trabalhos futuros e quais os pontos que poderão vir a ser melhorados.



## CAPÍTULO 2

### FLEXIBILIDADE

Define-se flexibilidade como “*Qualidade daquilo que é flexível. Aptidão para várias coisas ou aplicações.*” [11]. No seguimento desta definição surge o conceito de flexibilidade aplicado à energia, mais especificamente a flexibilidade energética. Assim, neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura no que se refere às várias definições de flexibilidade energética, dos indicadores que a quantificam e das aplicações já existentes para mesma.

#### 2.1. Definição Geral de Flexibilidade Energética

O conceito de flexibilidade aplicado ao sector energético foi definido em 2011 por Six et al. como um atraso no consumo da energia elétrica (ou de uma parte dele) num período limitado, ou noutra perspetiva, como uma alteração forçada do consumo num período específico [12]. Em 2013 Petersen et al., apresentaram uma definição semelhante onde a flexibilidade é a capacidade de desviar o consumo elétrico do seu plano, sendo um estado único, inato e dependente do tempo [13]. Numa perspetiva da rede, a flexibilidade pode ser definida a nível individual como “*On an individual level flexibility is the modification of generation injection and/or consumption patterns in reaction to an external signal (price signal or activation) in order to provide a service within the energy system. The parameters used to characterize flexibility include the amount of power modulation, the duration, the rate of change, the response time, the location etc.*” [14].

Já em 2015, De Coninck e Helsén definiram a flexibilidade de um sistema como a habilidade de desviar o consumo elétrico do seu perfil de referência, estando este conceito relacionado com *demand response* (DR). Ou seja, flexibilidade Energética pode ser definida como a possibilidade de alterar (adaptar, deslocar e trocar) o perfil de consumo elétrico [15]. Noutra vertente, D’hulst et al. caracterizaram a flexibilidade de um dispositivo como a variação do seu consumo, tendo em conta os limites funcionais e de conforto, de forma a garantir o bem-estar e a segurança, tanto do utilizador como dos dispositivos [16].

Segundo Valsomatzis et al., flexibilidade é definida em tempo e quantidade. A flexibilidade é expressa como a quantidade de procura energética que pode ser deslocada no tempo, de acordo com os pedidos/necessidades do utilizador. Assim, a flexibilidade energética demonstra como o consumo energético pode ser alterado num determinado instante de acordo com as necessidades do utilizador [17].

Em suma, as definições de flexibilidade energética supracitadas convergem em dois pontos principais: i) alterar/deslocar temporalmente o consumo de uma carga para onde seja mais conveniente/necessário ao longo do dia; ii) alterar o próprio funcionamento do dispositivo, tendo sempre em conta as necessidades e o conforto do utilizador, e os requisitos de bom funcionamento do próprio dispositivo.

## **2.2. Indicadores de Flexibilidade**

Com a definição do conceito de flexibilidade surge a necessidade de a quantificar, mais concretamente é necessário ter conhecimento da quantidade de flexibilidade que um dado sistema tem disponível num instante específico, de forma a avaliar qual o impacto do seu uso em diversos níveis. Como tal, surgem na literatura diversos indicadores, uns que classificam a flexibilidade com base no custo monetário da energia, e outros que a classificam, mas não estando diretamente relacionados com o custo da energia. Nas secções 2.2.1 e 2.2.2 são apresentados os indicadores que não têm em conta os custos energéticos e os que têm em consideração os referidos custos, respetivamente.

### **2.2.1. Quantificação da Flexibilidade Sem Ter em Conta Custos Energéticos e/ou Monetários**

Os indicadores com base no deslocamento de cargas não estabelecem uma relação direta com os custos energéticos, mas têm como principal objetivo satisfazer todos os requisitos de bem-estar do utilizador. No âmbito do projeto LINEAR (*Local Intelligent Networks and Energy Active Regions*), D'hulst et al. quantificaram o potencial de flexibilidade energética oferecido por 5 dispositivos diferentes com base em dados experimentais (i.e., máquinas de lavar roupa inteligentes, máquinas de lavar loiça, máquinas de secar, termoacumuladores e automóveis elétricos). O projeto LINEAR decorreu entre 2009 e 2014 na Bélgica e tinha como âmbito a introdução do conceito de *smart grid* e de tecnologias de *demand response* no sector habitacional [18].

No projeto LINEAR os dispositivos são classificados de acordo com duas características: i) dispositivos que de alguma forma permitem armazenar energia; e ii) dispositivos cujo ciclo de funcionamento pode ser deslocado no tempo, mais concretamente numa janela temporal definida pelo utilizador. Os dispositivos pertencentes a estas categorias são denominados por *buffered appliances* e *postponable appliances* respetivamente.

D'hust et al. definem o potencial de flexibilidade de um grupo de dispositivos como o aumento de potência  $P_{inc}$  e ou o decréscimo da mesma  $P_{dec}$ , num determinado instante do dia combinando ainda a duração possível para essa variação  $\Delta t$ . O potencial de flexibilidade permite saber quanta flexibilidade está disponível, num instante específico do dia e qual a duração dessa flexibilidade [16], existindo dois cenários possíveis para o cálculo da flexibilidade. O primeiro (Figura 2.1 - esquerda) acontece quando o consumo de energia de todos os dispositivos é adiado o mais possível. O segundo (Figura 2.1 - direita) ocorre quando o consumo de energia é o mais cedo possível.  $E_{max}$  e  $E_{min}$  representam o consumo de energia o mais cedo possível e o mais tarde possível, respetivamente, definindo assim os limites de flexibilidade para o consumo energético do conjunto de dispositivos.  $E_{min}$  representa a energia de consumo de referência no primeiro cenário e  $E_{max}$  no segundo.  $E_{max}$  e  $E_{min}$  são calculados através de medições de flexibilidade feitas para todos os dispositivos.  $P$  é a potência total resultante quando a flexibilidade do dispositivo é usada.

Em particular no primeiro cenário, o aumento de potência  $P_{inc}$  é calculado com base no princípio de que a potência associada ao consumo energético de referência ( $P_{ref}$ ) é adiada o mais possível. Para qualquer instante, esse incremento de potência pode ser realizado se a soma do mesmo e da referência  $P_{ref}$  não excederem a máxima potência disponível de todos os dispositivos.  $P_{inc}$  pode ser sustentado durante o intervalo de tempo  $\Delta t$  até que a flexibilidade para todos os dispositivos disponíveis seja utilizada, isto é, até que os limites de funcionamento de cada dispositivo os forcem a desligar. No segundo cenário é assumido que a potência  $P_{ref}$  do conjunto dos dispositivos é tal que o consumo de cada dispositivo é realizado o mais cedo possível. Isto é, o potencial de flexibilidade para o decréscimo da potência pode ser calculado com base no princípio de que este pode ser maximizado quando a potência  $P_{ref}$  é consumida o mais cedo possível. Para qualquer instante, esse decréscimo de potência pode ser realizado enquanto  $P_{dec}$  não exceder  $P_{ref}$  dos dispositivos disponíveis.  $P_{dec}$  pode ser sustentado durante o intervalo de tempo  $\Delta t$  até que a flexibilidade disponível por todos os dispositivos seja utilizada, isto é, até que os limites de funcionamento de cada dispositivo os forcem a voltar a ligar. Posto isto, o potencial de flexibilidade de um grupo de dispositivos é medido através da combinação de  $P_{inc}$  ou  $P_{dec}$  com o intervalo de tempo  $\Delta t$ , como se apresenta na Figura 2.2.

Segundo D'hust et al., *"Increasing or decreasing the power consumption at a certain time of day implies that energy consumption is shifted. This has an impact on the amount of flexibility available later, i.e., the so-called rebound effect. Note that our representation of the flexibility potential represents a 'snapshot' in time. It assumes that all flexibility is available and used at that specific point in time. It is hence an indication of the potential, rather than a tool that can be used for scheduling and/or calculating rebound effects"*, [16].

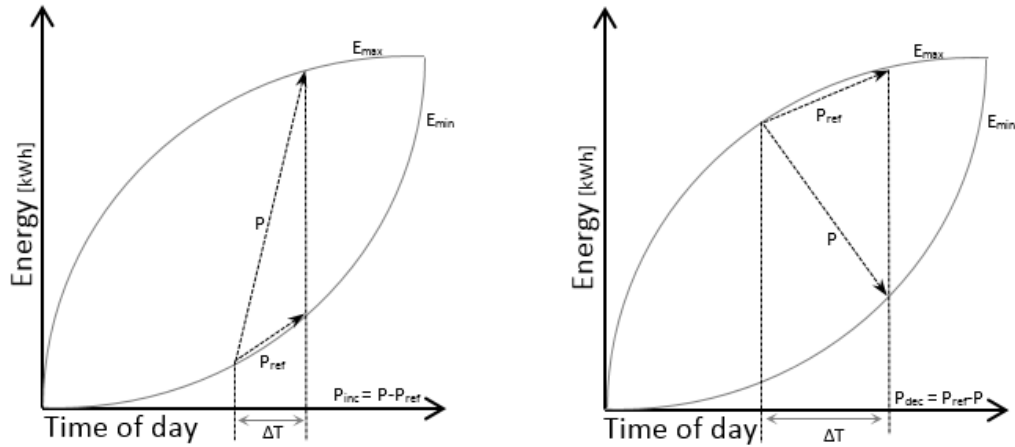


Figura 2.1 – Esquema do cálculo do potencial de flexibilidade para aumento (esquerda) e diminuição de potência (direita), adaptado de [16].

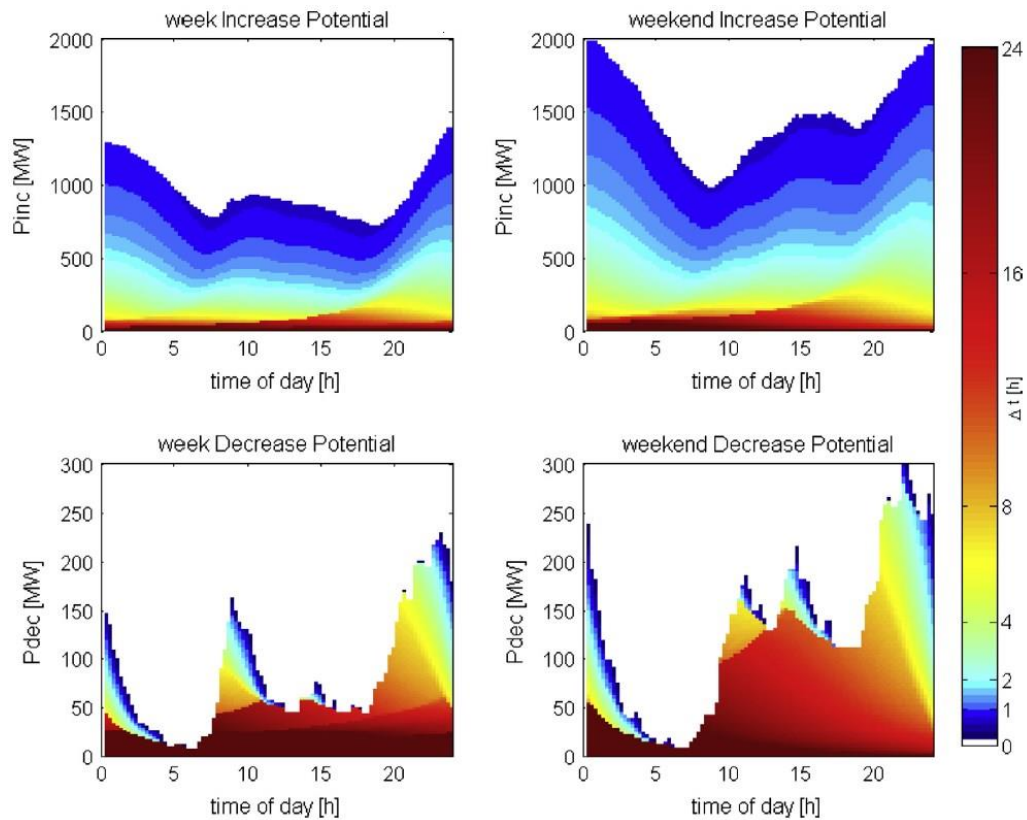


Figura 2.2 - Exemplo de um perfil de flexibilidade combinado de diversos dispositivos [16].

Outro indicador é definido por Daan Six et al. [12] que consideram a flexibilidade energética de um dado sistema como a capacidade de deslocar o seu consumo no tempo. Thomas Nuytten et al. [19] em continuação do estudo desenvolvido por Daan Six et al. definem flexibilidade com a mesma abordagem temporal, e ambos quantificam a flexibilidade de um sistema como sendo o número de horas que se pode antecipar ou atrasar o seu consumo.

A metodologia desenvolvida nestes trabalhos não é específica para nenhum sistema, contudo Daan Six et al. quantificam a flexibilidade de um sistema composto pela combinação

de bombas de calor ao nível residencial com armazenamento de energia térmica [12]. Por sua vez, Thomas Nyutten et al. quantificam a flexibilidade de um sistema composto por uma central de cogeração (*Combined Heat and Power*) onde o excesso de energia térmica produzida é armazenado num reservatório de água (*buffer*) [19]. O modelo do sistema foi desenvolvido tendo em conta o consumo energético referente ao aquecimento numa região, de forma a obter a flexibilidade criada pela combinação da central de cogeração com a unidade de armazenamento térmico.

Nyutten et al. consideram que o sistema funciona livremente dentro dos limites, máximo ou mínimo, da capacidade de armazenamento do *buffer*. Para obter a representação dos limites foram abordados dois casos que definem o funcionamento do sistema nas duas situações limite. O primeiro diz respeito ao caso em que é necessário ativar a central de cogeração uma vez que o armazenamento térmico é insuficiente para cumprir as exigências energéticas da região. Assim obtém-se a curva representativa do mínimo onde as exigências energéticas são sempre cumpridas, mas a energia armazenada no *buffer* é utilizada ficando o mesmo com a sua capacidade no nível mínimo. Por outro lado, tem-se o segundo caso onde o *buffer* é mantido na sua máxima capacidade. Esta situação acontece quando o funcionamento da central de cogeração supre as exigências energéticas e ainda armazena o excesso de produção no *buffer*. Contudo é importante notar que a produção da central de cogeração não deve ser superior à soma das exigências energéticas com a capacidade do *buffer*, de modo a que não ocorram perdas. Daqui resulta a curva representativa do máximo, ou seja, as exigências energéticas são cumpridas e além disso a capacidade do *buffer* é mantida no seu máximo. A flexibilidade é assim definida pelo espaço resultante entre as duas curvas, máximo e mínimo.

Definidos os limites de funcionamento do sistema através das curvas de máximo e mínimo, pode ser concluído que o sistema ao funcionar dentro dos limites está a cumprir as exigências energéticas, enquanto usa o armazenamento de energia térmica. E é nesse sentido que a combinação da central de cogeração com a unidade de armazenamento térmico cria a flexibilidade do sistema, isto porque a utilização da central pode ser deslocada no tempo em função das exigências energéticas e da quantidade de energia armazenada. Foram então definidos pelos autores dois tipos de flexibilidade, *delayed operation flexibility* e *forced operation flexibility*, onde o funcionamento da central é adiado e noutra é forçado, respetivamente.

A flexibilidade obtida quando o funcionamento da central é adiado (*delayed operation flexibility*) corresponde ao tempo ( $\Delta_{Delayed}$  na Figura 2.3 - esquerda) em que a central não é ligada e as exigências energéticas são cumpridas apenas pela energia presente no armazenamento térmico. De notar que para esta situação o reservatório está na sua capacidade máxima, ou perto de a atingir, no início do intervalo de tempo ( $\Delta_{Delayed}$  na Figura 2.3). Já a flexibilidade obtida pelo funcionamento forçado (*forced operation flexibility*), é quantificada pelo tempo ( $\Delta_{Forced}$  na Figura 2.3 - direita) em que a central pode ser forçada a entrar em funcionamento de forma a suprir as exigências energéticas, enquanto o excesso de produção é armazenado para ser utilizado mais tarde. Nesta situação o reservatório encontra-se completamente, ou

praticamente, vazio no início do intervalo de tempo ( $\Delta_{Forced}$  Figura 2.3), ou seja, o ponto inicial será na curva que representa a capacidade mínima de energia armazenada.

A metodologia de quantificação implementada pelos autores calcula a flexibilidade assumindo que não foi utilizada qualquer flexibilidade anteriormente, resultando assim no cálculo do máximo de flexibilidade disponível.

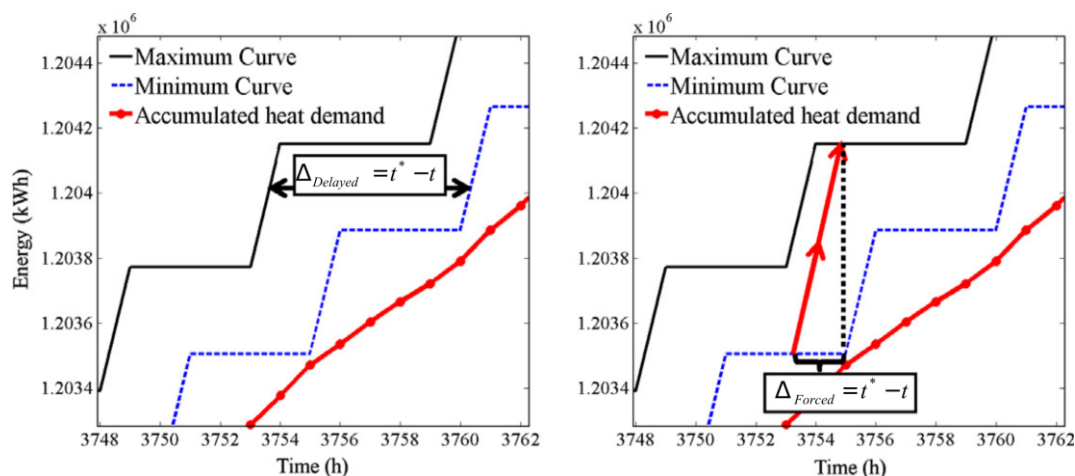


Figura 2.3 – Representação do funcionamento do sistema atrasado (esquerda) e forçado/adiantado (direita) [19]

## 2.2.2. Quantificação da Flexibilidade Tendo em Conta os Custos Energéticos e/ou Monetários

Nas subsecções seguintes são apresentados diversos indicadores que têm em conta os custos energéticos. Estes indicadores permitem estabelecer uma relação direta entre os custos implícitos no uso da flexibilidade, para que os custos energéticos possam ser reduzidos.

### 2.2.2.1. Quantificação da Flexibilidade Através de Curvas de Custo

De Conick e Helsen desenvolveram um indicador de flexibilidade com base em curvas de custo para quantificar a flexibilidade disponível. O trabalho dos autores baseia-se em avaliar a flexibilidade que um edifício apresenta por si só comparativamente a métodos de armazenamento de energia, como por exemplo bombas de calor, sistemas de ventilação e sistemas de armazenamento de energia térmica. Esta análise é elaborada a partir das curvas de custo, que permitem agregar a flexibilidade de diferentes edifícios ou de sistemas com recursos energéticos distribuídos, com a finalidade de observar o custo real de usar a flexibilidade disponível [20].

Os autores baseiam o método em pelo menos três estratégias de controlo ótimas. A primeira relaciona o funcionamento dito normal do edifício, mais concretamente tendo em conta os requisitos térmicos de conforto, com um horizonte de previsão de forma a minimizar os custos de operação. A segunda e a terceira baseiam-se em maximizar ou minimizar o consumo

energético durante um intervalo de tempo específico, tendo sempre presente o objetivo de minimizar os custos de operação. Este deslocamento de consumo representa a flexibilidade, e a diferença entre o custo de implementação destas estratégias e o custo de referência, representa o custo de desviar o consumo do plano de referência. É com base nestas três estratégias que são implementadas as curvas de custo [15]. As curvas de custo representadas na Figura 2.4 apresentam a flexibilidade disponível no eixo horizontal e o respetivo custo associado no eixo vertical.

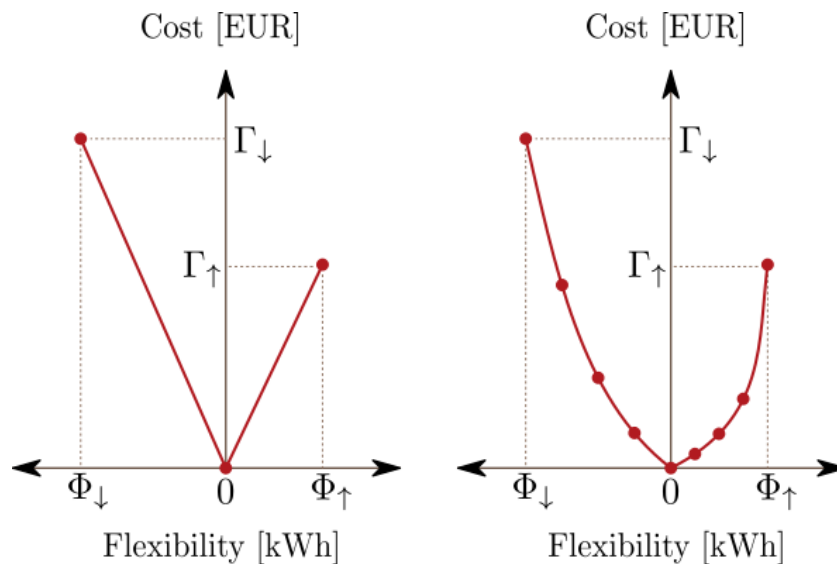


Figura 2.4 – Curvas de custo sem pontos intermédios (esquerda) e com pontos intermédios (direita) [15].

#### 2.2.2.2. Quantificação da Flexibilidade Através de Métodos de Controlo Direto e Indireto

Outro quantificador que tem como principal objetivo minimizar os custos energéticos dos consumidores, sem comprometer o conforto dos mesmos, é apresentado por Tahersima et al. [21]. O principal objetivo do trabalho desenvolvido pelos autores foi definir um critério de flexibilidade com base em duas estratégias de controlo, nomeadamente, controlo direto e indireto.

A metodologia de controlo indireto assenta na projeção de um perfil de custos com base numa previsão de 24 horas, de forma a encorajar os utilizadores a consumirem menos nas horas de pico concedendo um preço elevado a esses intervalos de tempo. Em particular, os autores pretendem que a principal tarefa do controlador de cargas não seja a redução do consumo no global, mas sim o deslocamento do funcionamento de uma bomba de calor dos períodos mais caros para os períodos com menores custos associados. A formulação do problema começa por definir a necessidade de um controlador, de forma a garantir que a temperatura de conforto nas divisões se mantém num certo intervalo. Este controlador usa os conhecimentos prévios do perfil de custos diários da eletricidade de forma a mover o consumo para os períodos mais adequados. A função que define os custos foi escolhida de forma a minimizar os cus-

tos de consumo, mantendo a temperatura das divisões em intervalos confortáveis para o utilizador de acordo com um perfil de temperatura, podendo existir algumas tolerâncias. O consumo que é possível deslocar está interligado com a tolerância térmica que os utilizadores definem (quanto maior a tolerância maior a redução dos custos). Outro fator relevante são as características térmicas do edifício.

Na abordagem referente ao controlo direto, o sistema atua de acordo com os sinais que recebe da rede, ou seja, se há um pico de potência a carga será desligada. As ações de ligar e desligar cargas são mais ou menos rígidas de acordo com o estabelecido entre o utilizador e a rede. A estratégia de controlo tem como princípio que em caso de existência de excedente de energia, essa energia é armazenada e será libertada quando as cargas são desligadas de forma a manter a temperatura dentro dos limites pré-definidos.

O sistema desenvolvido pelos autores tem como principal finalidade a medição da flexibilidade de um edifício individualmente, em termos da quantidade de energia que pode ser deslocada sem violar as restrições de conforto térmico previamente definidas. Para um valor de potência nominal constante e um intervalo de variação da temperatura previamente definido, observando a amplitude e a duração das variações de consumo em torno do valor nominal é possível caracterizar o índice de flexibilidade (Figura 2.5). De forma a caracterizar as variações máximas permitidas na potência, assume-se o instante  $T/2$ , como o instante em que a temperatura atinge um dos seus limites, e a amplitude do sinal de potência varia entre 0 e  $2 \times A$ .

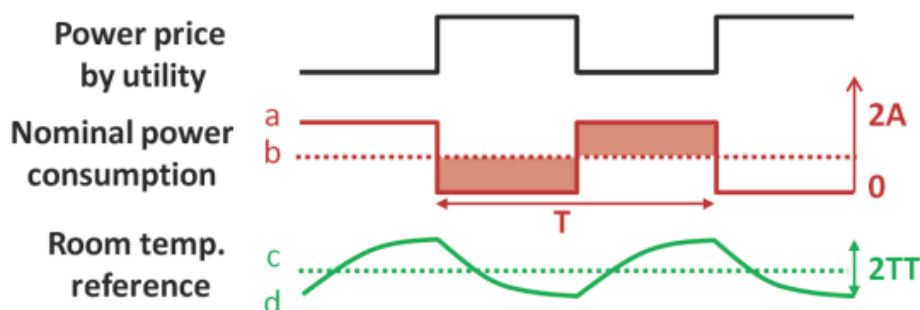


Figura 2.5 – Exemplo da representação da flexibilidade [21].

Por observação da Figura 2.5, se num instante com custos elevados for subtraído um dado valor de potência ao valor nominal, na metade seguinte desse período, quando os custos são reduzidos, tem de ser adicionado esse mesmo valor ao sistema, garantindo assim que o integral desse período mantém o valor nominal. Nem sempre será necessário que a potência (adicionada e subtraída) assuma os valores limites (0 e  $2 \times A$ ) para satisfazer as necessidades do utilizador, este caso pode ser observado na Figura 2.6. Analisando a Figura 2.6 - Topo, o caso onde o consumo subtraído e adicionado tem o valor limite ( $2 \times A$ ), na Figura 2.6 – Meio e Baixo encontram-se os casos onde o consumo subtraído e adicionado não corresponde ao valor limite.



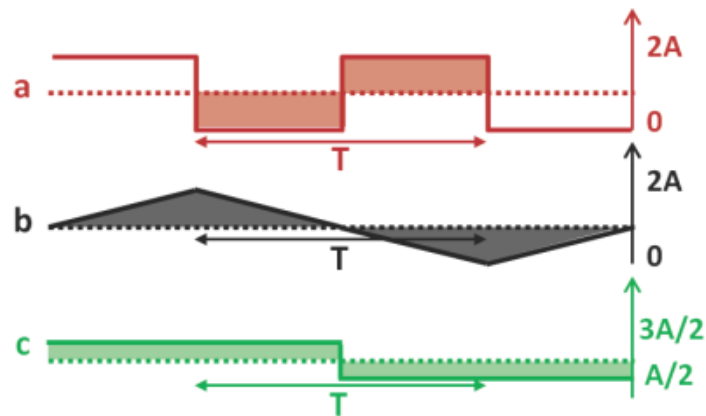


Figura 2.6 – Representação de alternativas na modificação do sinal de potência [21].

Em suma, através deste indicador é possível observar quais os períodos específicos em que o consumo deve ser deslocado, de forma a reduzir os custos e cumprindo os requisitos térmicos do utilizador, com base nas figuras apresentadas em cima.

### 2.2.2.3. Quantificação da Flexibilidade Através de Elasticidades do Preço

Outra perspectiva de classificação da flexibilidade surge pelos autores Stiphout et al. [22] no âmbito de um projeto que pretende classificar a flexibilidade disponível no sistema elétrico na Bélgica, com extrapolação para o ano de 2050. Foi assim desenvolvido um novo método para quantificar a flexibilidade de um sistema automático de *demand response*, associado a uma verificação dos custos em tempo real, com a finalidade de ser aplicado ao setor residencial, através das elasticidades do preço.

Inicialmente os dispositivos que apresentam flexibilidade são classificados como discretos ou contínuos. Sendo que, os primeiros têm como principal característica o seu ciclo de funcionamento ser pré-definido e não poder ser interrompido. São caso de estudo no trabalho desenvolvido pelos autores três tipos de dispositivos, nomeadamente: i) máquinas de lavar loiça; ii) máquinas de lavar roupa e iii) máquinas de secagem. Relativamente aos dispositivos contínuos não existe restrições no seu ciclo de funcionamento (podem ser interrompidos), têm uma potência de funcionamento variável, e reagem de acordo com as restrições do utilizador. Foram objeto de estudo bombas de calor e veículos elétricos.

Foi elaborada uma otimização do funcionamento dos dispositivos, de acordo com a caracterização mencionada em cima. De modo a minimizar os custos, a central de controlo que observa os preços em tempo real num dado intervalo de tempo, divide o funcionamento dos diversos dispositivos de acordo com os seguintes requisitos:

- Dispositivos discretos: O seu ciclo de funcionamento não pode ser interrompido, mas pode ser deslocado entre o instante de início e fim de um período definido pelo utilizador;

- Dispositivos contínuos: O utilizador define os limites máximos e mínimos entre os quais a temperatura deve variar, conforme a casa esteja ocupada ou não.

Esta otimização permite descobrir a quantidade relativa a um preço em cada instante. O processo de otimização é repetido para variações do preço, obtendo-se diferentes pontos  $(p, q)$ , onde  $p$  representa o preço e  $q$  a quantidade de potência elétrica utilizada. Com os pontos determinados foi realizada uma regressão em que os coeficientes resultantes expressam a relação entre  $p$  e  $q$  para cada instante. Os coeficientes resultantes são agrupados numa matriz, denominada matriz das elasticidades,  $\epsilon_{N \times N}$  na equação (2.2). Esta matriz representa a relação entre uma variação no preço da eletricidade  $\Delta p$  e uma variação na quantidade  $\Delta q$  relativa a um ponto de referência  $(p_{ref}, q_{ref})$ , através das equações (2.1), (2.3) e (2.4).

$$\epsilon_{N \times N} \cdot \Delta p = \Delta q \quad (2.1)$$

$$\epsilon_{N \times N} = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \cdots & \epsilon_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \epsilon_{N1} & \cdots & \epsilon_{NN} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

$$\Delta p = \frac{p - p_{ref}}{p_{ref}} \quad (2.3)$$

$$\Delta q = \frac{q - q_{ref}}{q_{ref}} \quad (2.4)$$

As equações (2.3) e (2.4) representam as diferenças relativas entre a potência elétrica utilizada e o preço no que diz respeito ao ponto de referência numa hora base. Na matriz (2.2) a elasticidade do próprio preço e a do preço cruzada são definidas em (2.5) e (2.6), respetivamente:

$$\epsilon_{ii} \cdot \Delta p_i = \Delta q_i \quad (2.5)$$

$$\epsilon_{ij} \cdot \Delta p_i = \Delta q_j \quad (2.6)$$

Em que  $\Delta p_i$  e  $\Delta q_i$  são definidos por (2.7) e (2.8), respetivamente:

$$\Delta p_i = \frac{p_i - p_{ref,i}}{p_{ref,i}} \quad (2.7)$$

$$\Delta q_i = \frac{q_i - q_{ref,i}}{q_{ref,i}} \quad (2.8)$$

Estas elasticidades (2.5) e (2.6) definem a relação linear entre o desvio do preço em relação à referência numa hora  $j$  e o desvio de potência elétrica associado na hora  $i$ . O horizonte temporal de preços que influencia o uso de eletricidade é de 24 horas, uma vez que tipicamente o ciclo residencial de consumo energético se repete a cada 24 horas.

No caso de estudo prático foi usado o método de Monte Carlo, de forma a ter uma estimativa da matriz de elasticidades média. Este foi aplicado à matriz das elasticidades de 100 vizinhanças. O resultado encontra-se na Figura 2.7, na qual pode ser observado um mapa de cores com a matriz das elasticidades médias para um dia nas diversas estações do ano. Os autores concluem que as maiores elasticidades são verificadas nos períodos de Inverno devido ao uso das bombas de calor e de aquecedores elétricos, fornecendo o uso destes uma maior flexibilidade. Esta verificação vem afirmar a importância do tipo de cargas para determinar a flexibilidade do setor residencial e a forte influência do clima no cálculo das elasticidades do preço. Por exemplo, num clima quente será preciso menos aquecimento nos períodos de Inverno, mas por outro lado será necessária uma maior refrigeração no Verão, o que possivelmente se traduz numa maior flexibilidade no período de Verão.

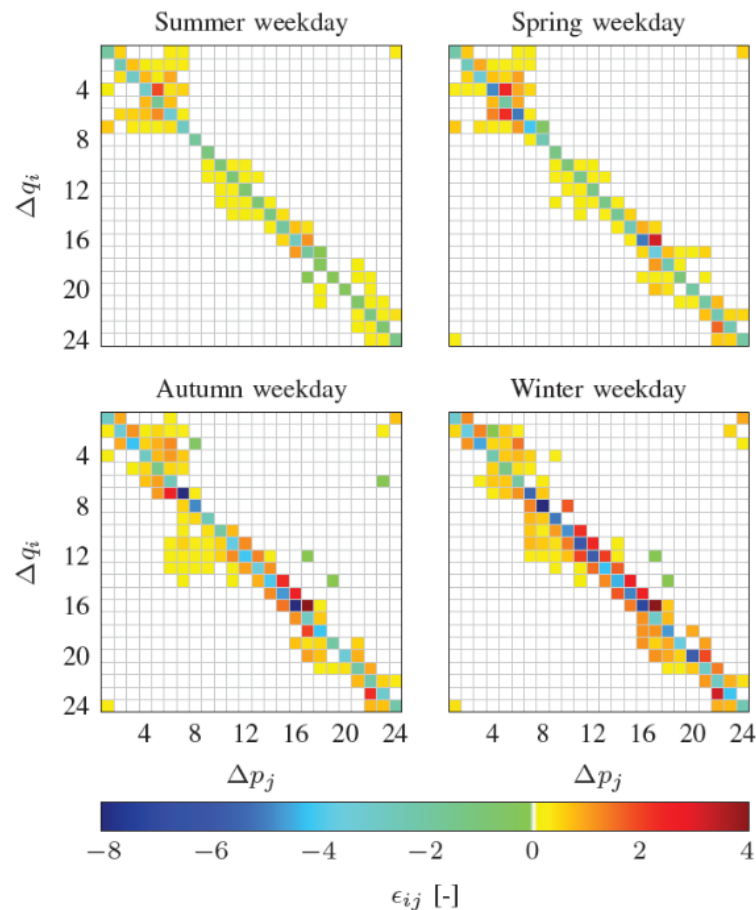


Figura 2.7 – Matriz das elasticidades do preço nas várias estações do ano [22].

Duas análises são feitas pelos autores através da Figura 2.7:

- Os valores presentes na diagonal da matriz, as elasticidades próprias, são negativos, o que significa que uma subida no preço na hora  $i$  se reflete na redução do consumo na hora  $i$ . Os maiores valores verificam-se nas horas 7,8 e 16. Como estes valores são determinados relativamente à potência elétrica de referência utilizada  $q_{ref,i}$ , estas horas não são necessariamente as horas onde a flexibilidade disponível é maior em termos absolutos. A Figura 2.8 mostra para uma queda de 1% no preço em todas as horas  $i$  ( $\Delta p_i = -1\%$ ), a alteração de potência elétrica  $q_i - q_{ref,i}$  resultante, referente às diferentes estações do ano em dias de semana (traço contínuo na Figura 2.8) e fim-de-semana (traço interrompido na Figura 2.8). A maior alteração ocorre pelas 5 horas da manhã e às 17.

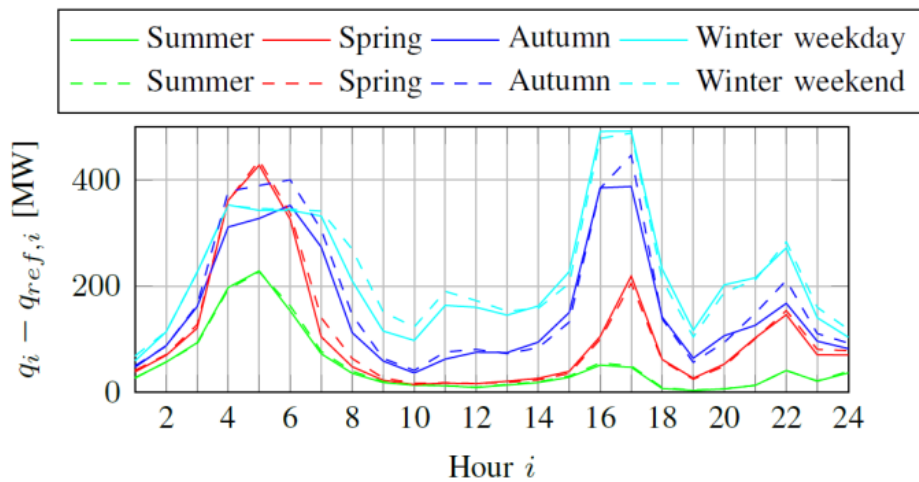


Figura 2.8 – Alteração absoluta da potência elétrica utilizada para um decréscimo do preço de 1% para cada hora ( $\Delta p_i = -1\%$ ), referente às diferentes estações do ano em dias de semana (traço contínuo) e fim-de-semana (traço interrompido) [22].

- Os valores fora da diagonal da matriz, elasticidades cruzadas, são praticamente todos positivos, o que permite determinar como a potência elétrica utilizada pode ser alterada ao longo do tempo. Na Figura 2.9, os autores apresentam um exemplo da alteração de um perfil de potência utilizada em relação ao seu perfil de referência, para um decréscimo do preço de 30% às 7 e às 15 horas. Como previsto, a potência elétrica utilizada nesses instantes aumenta, uma vez que o preço é mais baixo, e é reduzido nos instantes adjacentes. Observando na Figura 2.7 as elasticidades cruzadas, verifica-se de modo geral que o maior deslocamento de carga ocorre por volta das 7 horas.

Em suma, e apesar de não ser evidente, a Figura 2.8 permite ter uma noção da quantidade de flexibilidade que pode estar disponível em cada instante, para uma determinada altura do ano.

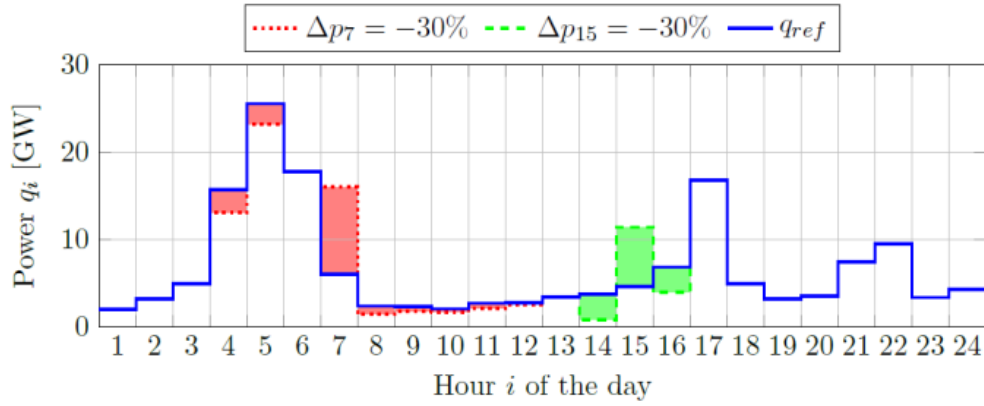


Figura 2.9 – Perfil de potência elétrica utilizada para uma redução do preço de -30% nas horas 7 e 15 [22].

#### 2.2.2.4. Quantificação da Flexibilidade Tendo em Conta a Eficiência da Deslocação de Carga

Frauke Oldewurtel et al. propõem um método de quantificação da flexibilidade em edifícios através do conceito de *Power Shifting Potential*  $\Delta P$  [23]. Isto é, apesar do conceito de flexibilidade não estar claramente definido pelos autores, estes denominam-no pelo potencial de deslocar o consumo de um edifício, o que na prática são dois termos que definem o mesmo conceito.

O potencial de alterar o consumo é definido como sendo a quantidade de potência que o edifício pode deslocar em relação ao seu consumo típico, sendo essas alterações divididas em dois tipos: o aumento e a diminuição de potência. Contudo tais alterações acarretam um custo, e de forma a incutir as variações dos custos em função das variações da potência os autores definem *Power Shifting Efficiency* (PSE) [23] como sendo a relação entre o potencial de alteração da potência utilizada para um certo instante de tempo e o consumo energético adicional do sistema durante um dado período de teste  $T$ . Posto isto pode ser distinguida a eficiência para o aumento e para a diminuição de potência, com  $\overline{PSE}$  (equação (2.13)) e  $\underline{PSE}$  (equação (2.14)) respetivamente.

Definindo,

$$\Delta P(s_{-i}) := P_i(s_{-i}) - P_i(s_0) \quad (2.9)$$

$$\Delta E_T(s_{-i}) := E_T(s_{-i}) - E_T(s_0) \quad (2.10)$$

$$\Delta P(s_i) := P_i(s_i) - P_i(s_0) \quad (2.11)$$

$$\Delta E_T(s_i) := E_T(s_i) - E_T(s_0) \quad (2.12)$$

para  $i = 1, \dots, 24$ , onde  $P_i(s)$  se refere à potência utilizada na hora  $i$  com base no preço  $s$ , e  $E_T(s)$  se refere à energia utilizada durante o período de teste  $T$  com base no preço  $s$ . Assim é definido com base nas equações anteriores ((2.9) a (2.12)):

$$\overline{\text{PSE}}(i) = \frac{\Delta P(s_{-i})}{\Delta E_T(s_{-i})} \quad (2.13)$$

$$\underline{\text{PSE}}(i) = \frac{\Delta P(s_i)}{\Delta E_T(s_i)} \quad (2.14)$$

Onde  $i = 1, \dots, 24$ , e os respectivos preços para cada hora  $i$  estão representados por  $s \in \{s_{-24}, s_{-23}, \dots, s_{-1}, s_0, s_1, \dots, s_{23}, s_{24}\}$ , em que  $s_0$  representa o preço base, e  $s_1, \dots, s_{23}, s_{24}$  representam os instantes onde há aumentos de preço, e  $s_{-24}, s_{-23}, \dots, s_{-1}$  os instantes onde há descidas de preço.

Os autores quantificam assim a flexibilidade oferecida por um edifício através da eficiência nas alterações do seu consumo. De forma a obter uma representação gráfica do quantificador, o comportamento de um edifício foi simulado para avaliar a sua potencialidade, resultando os gráficos da Figura 2.10 e Figura 2.11.

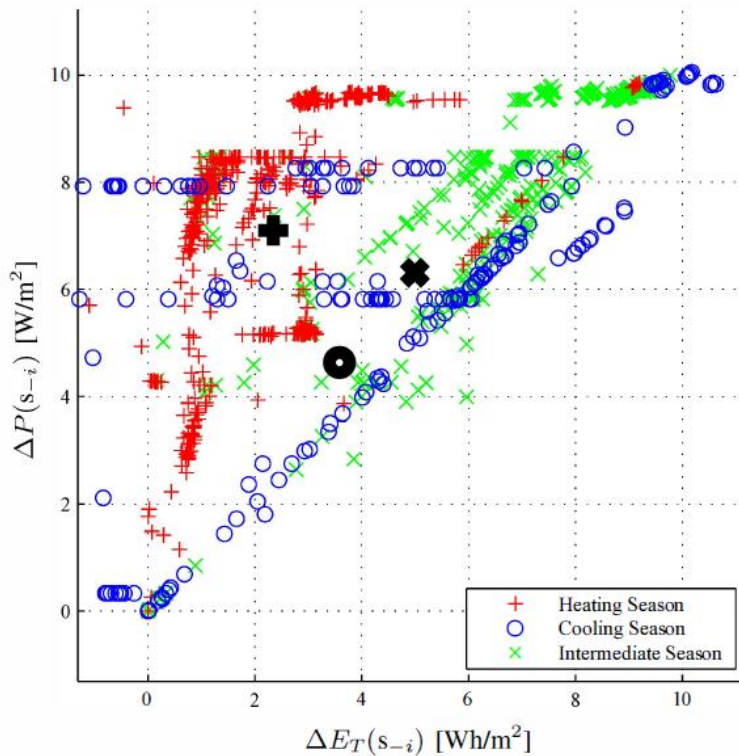


Figura 2.10 – Eficiência para o aumento de potência [23].

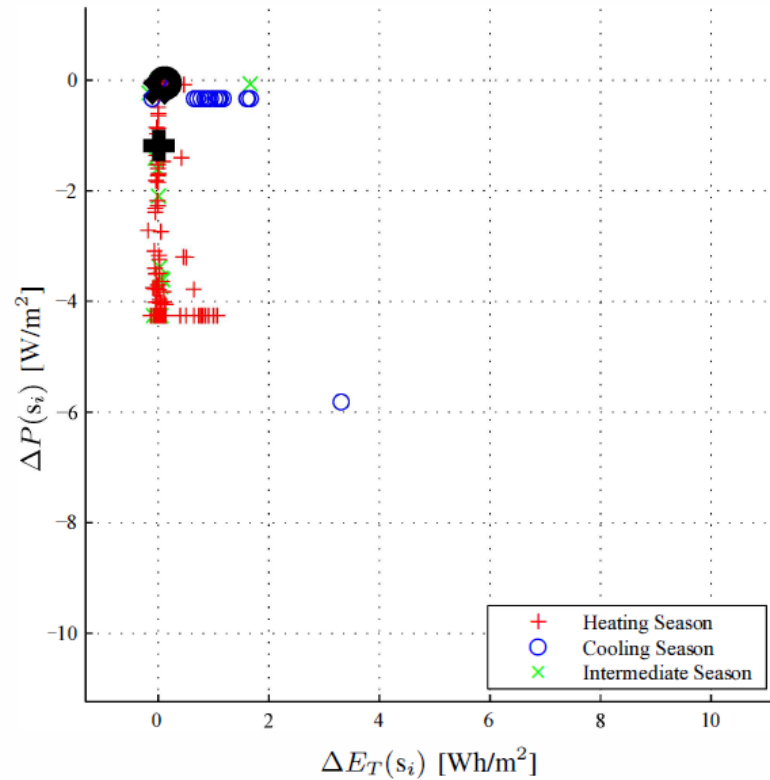


Figura 2.11 – Eficiência para a diminuição de potência [23].

Na Figura 2.10 e na Figura 2.11 encontra-se representada a eficiência para o aumento e diminuição de potência, respetivamente, para todas as horas de um dia tipo em cada estação do ano. O eixo vertical mostra o potencial de deslocar a potência  $\Delta P(s)$  e no eixo horizontal o respetivo aumento no consumo energético  $\Delta E_T(s)$  em função de  $\Delta P(s)$ , num dado intervalo  $s$ . Os casos com elevado potencial de aumento de potência e com grande eficiência associada ( $\overline{PSE}$  alto) ocorrem quando  $\Delta P(s)$  é elevado e  $\Delta E_T(s)$  é baixo, já nos casos com grande potencial de redução de potência e alta eficiência ( $\underline{PSE}$  alto) ocorrem quando  $\Delta P(s)$  e  $\Delta E_T(s)$  são mínimos. No caso do aumento de potência (Figura 2.10) pode-se verificar que é durante a altura mais quente do ano que se obtém o maior potencial e a maior eficiência associada, em comparação com as outras alturas do ano. Já no caso da diminuição (Figura 2.11), o potencial é muito baixo para todas as alturas do ano, apesar de terem todos uma elevada eficiência associada.

### 2.3. Aplicações da Flexibilidade Energética

A flexibilidade energética dispõe de diversas aplicabilidades e pode ser vista de uma perspetiva de um aglomerado de dispositivos ou de forma individual. A flexibilidade de uma habitação é dada pela agregação das flexibilidades individuais de todos os dispositivos presentes na mesma. Por sua vez, a flexibilidade de um edifício é dada pela agregação da flexibilidade das diversas habitações que constituem o mesmo, podendo assim o conceito ser escalado até uma dimensão global, onde teremos por exemplo a flexibilidade de uma região/zona. Neste

subcapítulo as aplicações da flexibilidade já implementadas na literatura serão apresentadas e divididas em duas perspetivas, nomeadamente, a aplicabilidade vista do lado da rede e do lado do consumidor. Por fim serão apresentados alguns projetos com casos de estudo implementados.

Do ponto de vista do consumidor, as aplicações onde a flexibilidade é abordada dizem maioritariamente respeito à utilização de eletrodomésticos (e.g. máquinas de lavar loiça, roupa, e de secar, entre outros [16] e [22]), bombas de calor ([16], [12] e [22]), sistemas de refrigeração (e.g. frigoríficos e congeladores [7]), aquecimento (e.g. termoacumulador [19] e [22]) e de ventilação (e.g. ar condicionado). O intuito da sua utilização tem como finalidade a minimização dos custos do consumo energético. Alguns autores estudam a aplicabilidade da flexibilidade em termos de um edifício/habitação, ou seja, aglomerando a flexibilidade dos diferentes dispositivos [15], [20], [21] e [23]. Na perspetiva da rede elétrica o uso de flexibilidade pode ser uma mais-valia na deslocação de cargas por exemplo para deslocar o consumo para horas de vazio, evitando a sobrecarga da rede nas horas de pico, podendo assim evitar a necessidade de inclusão de mais centrais de fornecimento de energia na rede por um curto espaço de tempo, de forma a colmatar as necessidades de curta duração.

Um caso de estudo baseado num edifício universitário na Noruega faz uso da aplicabilidade da flexibilidade e classifica as cargas de acordo com a sua flexibilidade [24]. O objetivo do trabalho desenvolvido é controlar os picos de consumo energético do edifício através do uso de vários perfis de flexibilidade tais como:

- **Shiftable profile load units:** Podem ser movidas mas o seu perfil energético não pode ser alterado, e.g. máquinas de lavar roupa;
- **Shiftable volume load units:** O seu perfil de consumo pode ser alterado desde que num dado horizonte temporal o total se mantenha o mesmo, e.g. Carregamento de carros elétricos;
- **Reducible load unit:** A carga pode ser reduzida até um certo limite sem ser desligada, e.g. Diminuir a intensidade da luz;
- **Disconnectable load units:** A unidade pode ser ligada ou desligada (dentro de um determinado intervalo de tempo), e.g. Frigorífico;
- **Inflexible load units:** Unidades sem flexibilidade, ou seja, necessitam de estar ligadas rigidamente conforme os padrões de conforto do utilizador, e.g. Dispositivos para cozinhar.

O modelo desenvolvido para o caso de estudo do sistema energético divide-se em duas partes, nomeadamente, aquecimento e energia elétrica que alimentam as cargas do edifício. O aquecimento provem da fonte elétrica e de combustíveis fósseis, e tem agregado um sistema de armazenamento térmico (reservatório de água). A metodologia de controlo da flexibilidade baseia-se num princípio de previsão de preços e consumo do edifício num horizonte temporal de



24 horas, onde a utilização de energia elétrica e de energia térmica são combinados. Ou seja, por exemplo, no caso de os preços da eletricidade sofrerem um aumento num certo instante uma das ações possíveis é alimentar a carga do edifício através de combustível fósseis em vez de energia elétrica. Desta forma consegue-se reduzir os gastos energéticos. Outro dos fins é a diminuição do pico do consumo através do uso da flexibilidade presente em cada instante no edifício.

Além dos diversos casos de estudo como o mencionado no parágrafo em cima, e em adição aos já referidos no subcapítulo 2.2, existem alguns estudos sobre a utilização da flexibilidade com projetos piloto implementados, nomeadamente o projeto ADDRESS e LINEAR.

O projeto europeu ADDRESS (*Active Distribution networks with full integration of Demand and distributed energy RESourceS*) teve início em 2008 com duração de cinco anos. O seu objetivo principal foi desenvolver uma ferramenta técnica de *active demand*, sendo esta definida pelos autores como “*Active Demand (AD) means the active participation of domestic and small commercial consumers in the electricity markets and in the provision of services to the other electricity system participants*”, [25] e [26]. A arquitetura proposta no projeto assenta no conceito de *aggregation of demand flexibility*, isto é, um agregador que junta a flexibilidade e contribuições vindas dos consumidores e *prosumers* (i.e., entidades que são tanto produtores como consumidores) que se encontram ligados à plataforma, com a finalidade de criar serviços baseados em *active demand* e oferece-los aos participantes. Os participantes nos mercados dividem-se em dois tipos, regulados (operadores de distribuição e de transporte) e não-regulados (produtores, intermediários e consumidores). Os serviços oferecidos de *active demand* para os participantes regulados incidem numa perspetiva de organização e estabilização da rede elétrica. Por outro lado, para os participantes não regulados, os serviços consistem numa abordagem económica, ou seja, custos de compra e venda de energia elétrica.

Foram realizados três casos de estudo de forma a testar e avaliar a tecnologia desenvolvida ao longo do projeto, cada um focando diferentes abordagens e em localizações distintas [27]:

- **Espanha:** Testes na rede elétrica de baixa tensão com *demand side management* do ponto de vista do consumidor;
- **Itália:** Testes na rede elétrica de média tensão com várias fontes de produção de média tensão, de forma a estudar as interações da geração distribuída em vários pontos da rede elétrica de média tensão;
- **França:** Testes na rede elétrica de baixa tensão conectada a um *feeder* de média tensão com *demand side management* e fontes de energia renovável ligadas ao nível de baixa tensão.

Em suma a implementação e o desenvolvimento deste projeto impulsionou a participação ativa dos consumidores no mercado elétrico, permitindo assim desenvolver uma nova

perspetiva do sistema elétrico. Este estudo forneceu uma nova arquitetura que aglomera a perspetiva económica e tecnológica de forma a oferecer serviços baseados em *active demand* para os vários participantes do mercado elétrico. Esta arquitetura integra ainda a produção de energia através de fontes renováveis e a geração distribuída de pequena escala na rede.

No ano seguinte, em maio de 2009, surge o projeto LINEAR (*Local Intelligent Networks and Energy Active Regions*) [18], na Bélgica com o objetivo de estudar a introdução de novas tecnologias em *smart-grids* e da sua validação em condições reais. Consistiu numa pesquisa e num projeto piloto de larga escala ao nível residencial com ênfase no estudo de *active demand side management* em cargas domésticas, através de soluções que possibilitam a combinação do consumo energético residencial com a energia disponível em fontes solares ou eólicas [28]. O projeto combina uma abordagem direcionada ao utilizador, com foco na inovação tecnológica onde todas as componentes são suportadas por uma avaliação económica. Mais especificamente dividiu-se em 3 fases fulcrais:

- **Fase 1:** Teve início em 2011 e consistiu em testes por parte dos familiares, amigos e colegas dos fundadores do projeto. Foi a primeira fase de testes depois da validação laboratorial e permaneceu ativa durante todo o projeto;
- **Fase 2:** Esta fase incluiu cerca de 100 utilizadores distribuídos geograficamente pela região de Flanders e esteve ativa entre abril de 2013 e abril de 2014;
- **Fase 3:** Nesta fase o equipamento de *active demand* foi instalado por mais 100 utilizadores, distribuídos por duas cidades, através da infraestrutura de *smart metering* previamente instalada pela distribuidora de energia. Esta fase permitiu medir e atuar em tempo real perante estímulos recebidos pela rede de distribuição (esteve ativa entre junho de 2013 e julho de 2014).

As fases 2 e 3 foram precedidas da recolha de medições, de forma a ter valores de referência para a realização das mesmas. A cooperação entre os utilizadores e a rede permitiu adquirir as competências necessárias e a experiência na área das *smart grids* e o uso de *smart meters* possibilitou um acesso detalhado aos perfis de cerca de 1000 utilizadores. O projeto teve como aplicação uma vasta seleção de dispositivos ao nível residencial, que apresentam flexibilidade (e.g. máquinas de lavar roupa e loiça, máquinas de secar roupa, bombas de calor, termoacumuladores e carros elétricos).

# CAPÍTULO 3

## APROVEITAMENTO DA FLEXIBILIDADE ENERGÉTICA DE FRIGORÍFICOS

No presente capítulo é descrito o funcionamento do dispositivo em estudo, o frigorífico, o modelo representativo do seu funcionamento e a respetiva validação. Por fim, é apresentada a descrição da metodologia desenvolvida para o estudo da flexibilidade energética no funcionamento do frigorífico.

### 3.1. Funcionamento do Frigorífico

O funcionamento do frigorífico assenta num processo de trocas de calor, onde o calor é transferido desde o seu interior para o exterior, de forma a baixar a temperatura no interior. Este processo de refrigeração é baseado no princípio de funcionamento da máquina térmica de Carnot e é denominado por ciclo de refrigeração por compressão de vapor (*vapor-compression refrigeration cycle*) [29] [30]. Os componentes constituintes do frigorífico e integrantes no ciclo de refrigeração estão representados na Figura 3.1, e em baixo é apresentada uma breve descrição da função de cada um [31]–[35]:

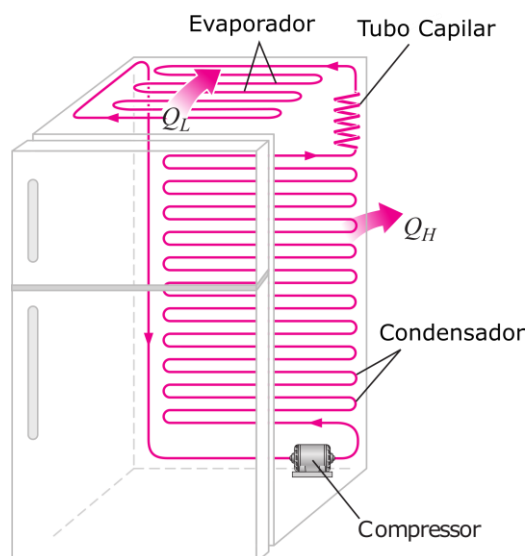


Figura 3.1 – Componentes constituintes do frigorífico, adaptado de [30].

- Compressor: Tem como função comprimir o fluido frigorigéneo<sup>1</sup> e promover a sua circulação pelo sistema do frigorífico. Mais concretamente, no interior do compressor o fluido encontra-se no estado gasoso, onde ocorre um aumento da pressão o que consequentemente provoca um aumento da temperatura.
- Condensador: A sua função é realizar a transferência de calor do fluido para o meio ambiente. O fluido proveniente do compressor no estado gasoso entra no condensador realizando assim as trocas de calor com o meio ambiente, arrefecendo e saindo no estado líquido. O condensador é constituído por um tubo em forma de serpentina e situa-se normalmente na parte de trás do frigorífico de forma a dissipar o calor.
- Evaporador: É uma parte fundamental do sistema, dado que tem como função garantir a capacidade de refrigeração dos alimentos através da extração de calor do interior do frigorífico. O fluido frigorigéneo percorre o interior do evaporador e é transformado em gás absorvendo assim o calor do interior do frigorífico. O evaporador é essencialmente uma serpentina de tubos. Sendo a sua eficiência influenciada por diversos fatores: i) ter uma superfície suficiente para absorver a carga de calor necessário; ii) espaço suficiente para o fluido frigorigéneo; e iii) espaço suficiente para a circulação do fluido sem queda de pressão excessiva entre a entrada e a saída.
- Dispositivo de Expansão: Tem como função auxiliar o funcionamento do evaporador, ou seja, reduzir a pressão do fluido frigorigéneo e controlar a quantidade do mesmo que entra no evaporador. Em dispositivos de pequena capacidade (abaixo de 10 kW) é usado um tubo capilar, nos casos de maior capacidade usa-se válvulas de expansão termostáticas. No que diz respeito ao tubo capilar, à medida que o fluido percorre o tubo, a pressão cai devido à fricção e movimento do fluido no interior do tubo. As varia-

<sup>1</sup> Os fluidos frigorigéneos são substâncias utilizadas como veículos térmicos na realização dos ciclos de refrigeração [35].

ções de pressão podem ser reguladas através da combinação de valores de diâmetro e comprimento do tubo. No caso das válvulas, estas regulam o caudal do fluido de acordo com a variação de temperatura que ocorre a saída do evaporador.

O funcionamento do frigorífico é composto por duas fases: i) uma fase onde o compressor está ligado, ou seja, onde ocorre o arrefecimento do interior do frigorífico; e ii) uma fase onde o compressor está desligado e se dá o aquecimento. Em suma, é na fase em que o compressor está ligado que o ciclo de refrigeração atua no funcionamento do frigorífico. Através da Figura 3.2 pode ser observado o esquema do ciclo de refrigeração. O ciclo tem início na compressão do fluido frigorigénico (na sua forma gasosa) através do compressor, nesta fase devido ao aumento da pressão a temperatura do fluido também aumenta, e assim transita do ponto 1 para o ponto 2 do esquema. Em seguida, o fluido entra no condensador com uma temperatura e pressão elevada, e à medida que se movimenta ao longo do condensador realiza trocas de calor com o meio ambiente, devido à sua temperatura ser superior à temperatura exterior. Desta forma, arrefece e passa ao seu estado líquido, transitando do ponto 2 para o ponto 3 do esquema. O fluido já estando no seu estado líquido, entra no dispositivo de expansão (tubo capilar) que provoca uma diminuição da pressão e em consequência também da temperatura, transitando assim do ponto 3 para o ponto 4 do esquema. Nesta fase o fluido tem uma temperatura e uma pressão baixas, entra no evaporador e é aqui que se realizam as trocas de calor com o interior do frigorífico. O fluido tendo uma temperatura inferior à do interior absorve o calor presente no interior, o que provoca a sua transição para o estado gasoso à medida que percorre a serpentina, passando assim do ponto 4 para o ponto 1 do esquema e finalizando o ciclo. Este ciclo é repetido enquanto o frigorífico se encontrar na fase de arrefecimento [29] [30] e [34].

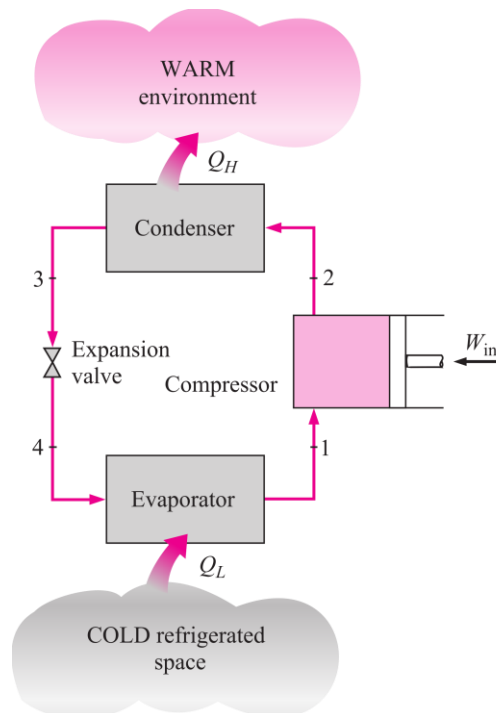


Figura 3.2 – Esquema do ciclo de refrigeração por compressão de vapor, adaptado de [30].

### 3.2. Modelo Utilizado

De acordo com o funcionamento do frigorífico descrito na subsecção 3.1 foi modelado o comportamento da temperatura interna do frigorífico. O modelo utilizado teve como base o modelo apresentado por Stadler et al. [36], em 2008, sendo este representado pela seguinte expressão matemática (3.1) e os respetivos parâmetros:

$$T_{i+1} = \varepsilon T_i + (1 - \varepsilon) \times \left( T^0 - \eta \frac{q_i}{A} \right) \quad \text{com } \varepsilon = e^{\frac{-\tau A}{m_c}} \quad (3.1)$$

$T_i$  – Temperatura interior do frigorífico no instante  $t_i$  [°C];

$\varepsilon$  – Inércia do sistema;

$T^0$  – Temperatura ambiente [°C];

$\eta$  – Coeficiente de performance do frigorífico;

$q_i$  – Potência do estado do compressor [W];

$A$  – Condutividade térmica [W/(m°C)];

$m_c$  – Massa térmica [kWh/(°C)]

$\tau$  – Intervalo entre dois pontos no tempo  $t_i$  e  $t_{i+1}$  [min].

Este modelo pode ser decomposto em duas equações de acordo com a fase de funcionamento do frigorífico (definido em 3.1):

$$T_{i+1} = \varepsilon T_i + (1 - \varepsilon) \times (T^0) \quad \text{com } \varepsilon = e^{\frac{-\tau A}{m_c}} \quad (3.2)$$

$$T_{i+1} = \varepsilon T_i + (1 - \varepsilon) \times \left( T^0 - \eta \frac{q_i}{A} \right) \quad \text{com } \varepsilon = e^{\frac{-\tau A}{m_c}} \quad (3.3)$$

As equações (3.2) e (3.3) representam a fase de aquecimento e de arrefecimento, respetivamente. Existem vários parâmetros que influenciam o cálculo da temperatura interna do frigorífico, nomeadamente, a massa térmica  $m_c$ , a potência do compressor  $q_i$ , a temperatura ambiente  $T^0$ , o coeficiente de performance  $\eta$ , e a condutividade térmica  $A$ . No capítulo 4.3 será analisado o efeito da variação de alguns destes parâmetros do modelo no cálculo da flexibilidade energética, nomeadamente, a potência e a massa térmica. Este modelo considera a temperatura ambiente e um coeficiente de performance, contudo não considera as perdas energéticas que o sistema possa ter provenientes da intervenção do utilizador (e.g. as perdas energéticas relativas à abertura da porta do frigorífico).

O modelo supracitado foi utilizado para simular o comportamento da temperatura interna do frigorífico por recurso à ferramenta de *software* Matlab. Para esta simulação foram considerados os valores dos parâmetros apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Valor dos parâmetros necessários à implementação do modelo da equação (3.1). Adaptado de [36].

Parâmetro	Símbolo	Valor
Condutividade Térmica (W/m°C)	A	3,21
Intervalo de tempo entre temperaturas (min)	$\tau$	1
Massa térmica (kWh/°C)	$m_c$	12,05
Potência Compressor (W)	$q_i$	70
Coeficiente de Performance	$\eta$	3,0
Temperatura Ambiente (°C)	$T^0$	25

De forma a simular o comportamento da temperatura interna foi ainda definido o intervalo de funcionamento para todos os frigoríficos entre 3 e 8 °C,  $T_{min}$  e  $T_{max}$  respetivamente [36]. As simulações foram realizadas para um período de 12 horas, e os valores relativos à temperatura interna do modelo e do estado do compressor são calculados com uma resolução de 1 minuto durante o período de simulação já referido. O resultado obtido relativo à simulação do funcionamento de um frigorífico é apresentado na Figura 3.3, onde pode ser observada a variação da temperatura interna de um frigorífico entre o intervalo definido  $[T_{min}, T_{max}]$  e o estado de funcionamento do compressor de acordo com essa variação. Foi assumida uma temperatura inicial de 3 °C e o estado do compressor desligado inicialmente.

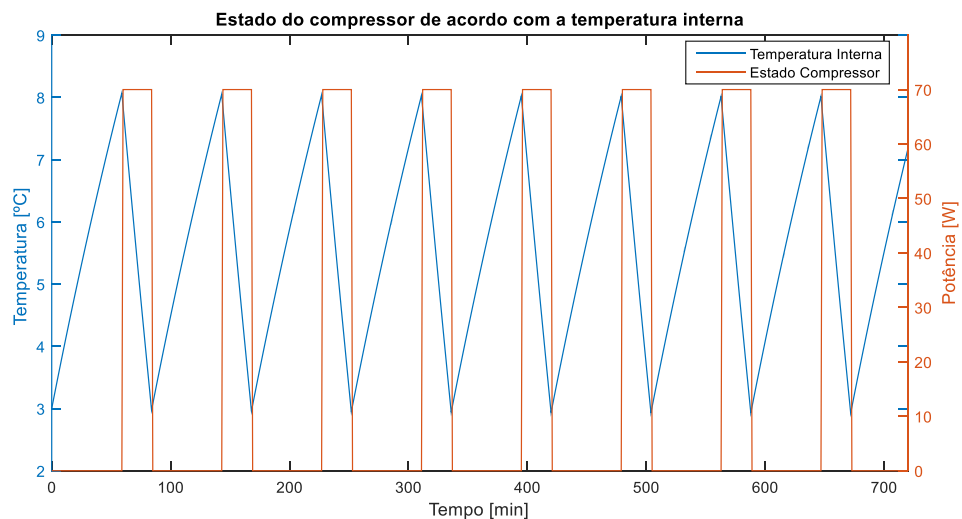


Figura 3.3 – Simulação da variação da temperatura interna do frigorífico e do funcionamento do compressor de acordo com essa variação, ao longo de 12 horas.

Analisando a Figura 3.3 pode ser verificado que quando a temperatura interna atinge o valor  $T_{max}$  o estado do compressor é alterado, entrando em funcionamento de modo a que a temperatura interna decresça e atinja o valor  $T_{min}$ , onde o compressor volta a ser desligado. Sendo este processo repetido ao longo do tempo de simulação, comprovando assim o seu funcionamento cíclico.

Procedeu-se também à simulação do modelo com vários frigoríficos em simultâneo, Figura 3.4. De modo a que os frigoríficos apresentem um comportamento desfasado, foi definida de forma aleatória o estado inicial de funcionamento do compressor e a temperatura inicial de simulação de cada frigorífico, dentro dos limites máximos de 3 a 8 °C.

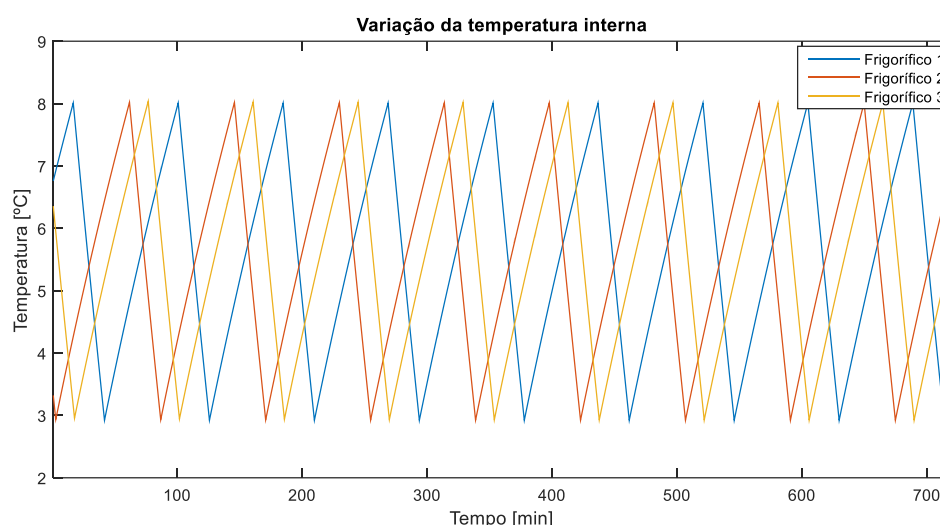


Figura 3.4 – Simulação da variação da temperatura interna de 3 frigoríficos ao longo de 12 horas.

### 3.3. Validação do Modelo do Frigorífico

Como forma de validar o modelo supracitado no subcapítulo 3.2, realizou-se uma simulação do modelo onde o resultado foi comparado com dados reais de funcionamento de um frigorífico, ao longo de aproximadamente 19 horas e 36 minutos (1176 minutos), Figura 3.5. Os parâmetros do modelo utilizados para a simulação foram definidos de acordo com os valores presentes na Tabela 3.2. De referir ainda que os dados reais se obtiveram num ambiente de simulação onde a porta do frigorífico foi mantida fechada.

Observando a Figura 3.5, conclui-se que o modelo selecionado descreve o funcionamento do frigorífico de uma forma aceitável nestas condições. Porém, devido às limitações do modelo já mencionadas no subcapítulo 3.2, o comportamento resultante é uma aproximação do funcionamento real, visto que existem dinâmicas variáveis que não são consideradas no modelo utilizado.



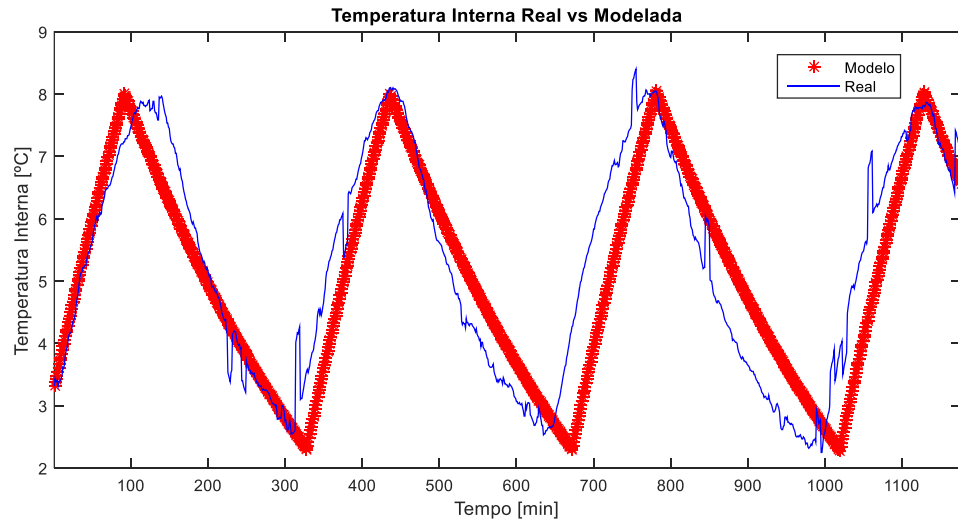


Figura 3.5 – Variação da temperatura interna real e modelada ao longo de 19 horas e 36 minutos (1176 minutos).

Tabela 3.2 – Parâmetros do modelo da equação (3.1) utilizados na simulação presente na Figura 3.5

Parâmetro	Símbolo	Valor
Condutividade Térmica (W/m°C)	A	4,41
Intervalo de tempo entre temperaturas (min)	$\tau$	1
Massa térmica (kWh/°C)	$m_c$	27,43
Potência Compressor (W)	$q_i$	115
Coefficiente de Performance	$\eta$	1,12
Temperatura Ambiente (°C)	$T^0$	25

### 3.4. Medição da Flexibilidade Energética

O conceito de flexibilidade energética está associado ao frigorífico na perspectiva da alteração do seu funcionamento. Isto é, modificando o seu estado (de ligado para desligado) num determinado instante e utilizando a sua capacidade de armazenamento de energia térmica, para manter o seu funcionamento dentro dos limites térmicos previstos, irá resultar na alteração do seu perfil de consumo energético. Sendo o seu perfil de consumo energético previsível, devido ao seu funcionamento cíclico, a flexibilidade pode ser estimada através da comparação entre o seu plano de consumo típico e a alteração prevista ao plano. Como já mencionado, o funcionamento do frigorífico é composto por duas fases. Uma fase de arrefecimento, onde o compressor está em funcionamento levando a sua temperatura interna a descer até ao limite mínimo. E uma fase de aquecimento, onde o compressor não está em funcionamento e a temperatura interna sobe gradualmente até ao limite máximo. A medição da flexibilidade energética

no frigorífico está diretamente correlacionada com a variação da temperatura no seu interior e o correspondente comportamento do compressor. Tendo em conta que o compressor só está em funcionamento numa das fases, e sendo este o responsável pelo consumo energético do frigorífico, é nessa fase que se poderá utilizar a flexibilidade energética.

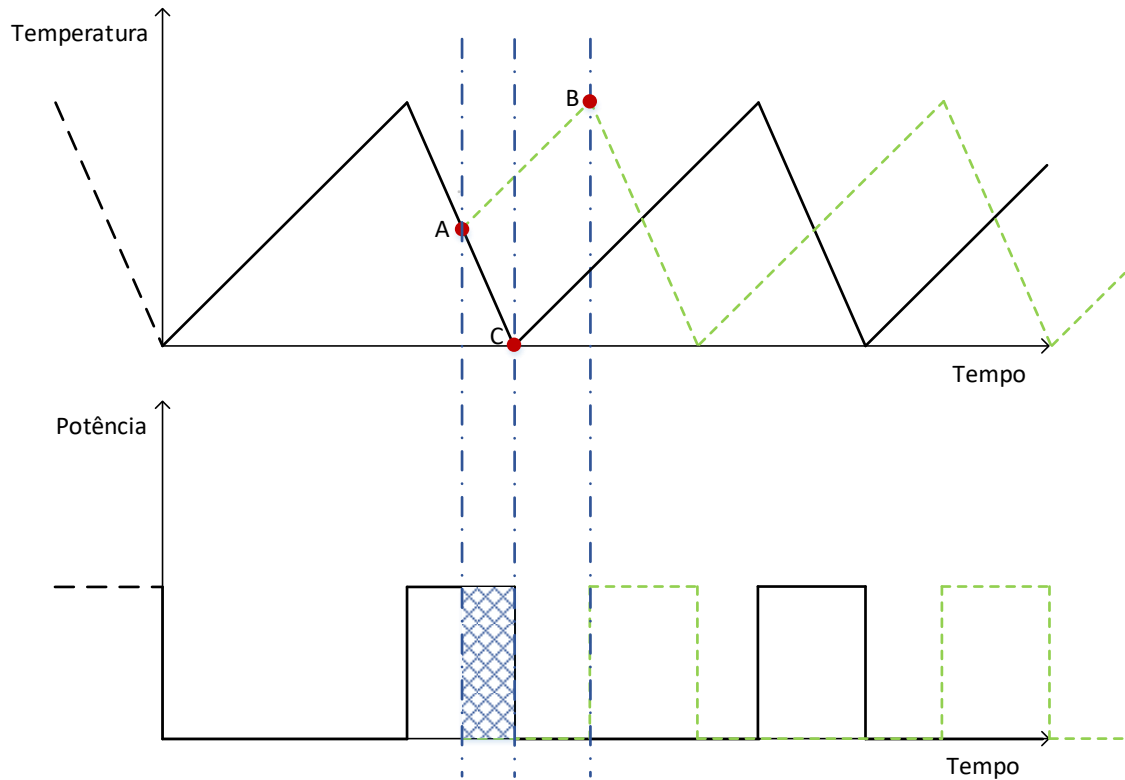
O método de cálculo da flexibilidade desenvolvido tem como base a representação da temperatura interna do frigorífico, obtida através do modelo enunciado na subsecção 3.2. Numa primeira fase foi estudada a metodologia de cálculo de forma individual, ou seja, apenas para um frigorífico isolado e depois para um conjunto de frigoríficos.

#### **3.4.1. Individual**

O desenvolvimento do método de cálculo da flexibilidade teve como início o caso de apenas um frigorífico, visto que se torna bastante mais perceptível estudar o comportamento de um dispositivo. Como referido anteriormente, o funcionamento do frigorífico é composto por duas fases, sendo que o compressor apenas tem influência numa delas, a de arrefecimento. Nesta fase existe uma janela de oportunidade para desligar o compressor, tirando partido do armazenamento de energia térmica do frigorífico para manter a temperatura no seu interior dentro dos limites (3 a 8 °C). Ao desligar o compressor nesta fase, o frigorífico não irá consumir energia no período compreendido entre o instante em que se desliga, até ao instante em que a temperatura volta de novo a atingir o limite máximo. Este período representa o intervalo de tempo onde o consumo energético do frigorífico pode ser alterado sem prejudicar a estabilidade do seu funcionamento.

O cálculo da duração da flexibilidade é realizado através da diferença entre dois instantes, nomeadamente, o instante onde se desliga o frigorífico e o instante até onde pode permanecer desligado, tendo em conta as condições descritas nos casos infracitados. A flexibilidade representa a potência que pode não ser consumida pelo frigorífico ao longo da duração calculada, resultando assim numa alteração ou desvio do plano do seu consumo energético. De modo a explicitar o método desenvolvido, foram realizados esquemas auxiliares (Figura 3.6 e Figura 3.7) representativos de diferentes casos do cálculo da flexibilidade de um frigorífico.

**Caso 1 – Temperatura atinge o limite máximo após o instante em que atingiria o limite mínimo no funcionamento normal**



*Figura 3.6 – Cálculo da flexibilidade no frigorífico – Caso 1. Representação da variação da temperatura interior do frigorífico (em cima), e do estado do compressor (em baixo). A preto o funcionamento normal do frigorífico, e a tracejado verde o funcionamento alterado.*

Na Figura 3.6 é apresentado o caso em que o instante onde o frigorífico é desligado (Ponto A - Figura 3.6), faz com que o instante onde a temperatura no interior atinge novamente o limite máximo (Ponto B - Figura 3.6) aconteça depois do instante onde, no seu funcionamento normal, a temperatura atingiria o limite mínimo (Ponto C - Figura 3.6). Nesta situação a duração da flexibilidade é representada pelo intervalo compreendido entre os pontos A e C, visto que em funcionamento normal o frigorífico estaria a funcionar apenas até ao ponto C. Durante o período compreendido entre os pontos A e C, o frigorífico tem a possibilidade de não consumir a energia correspondente à área a sombreado no gráfico do estado do funcionamento do compressor da Figura 3.6.

### Caso 2 – Temperatura atinge o limite máximo antes do instante em que atingiria o limite mínimo no funcionamento normal

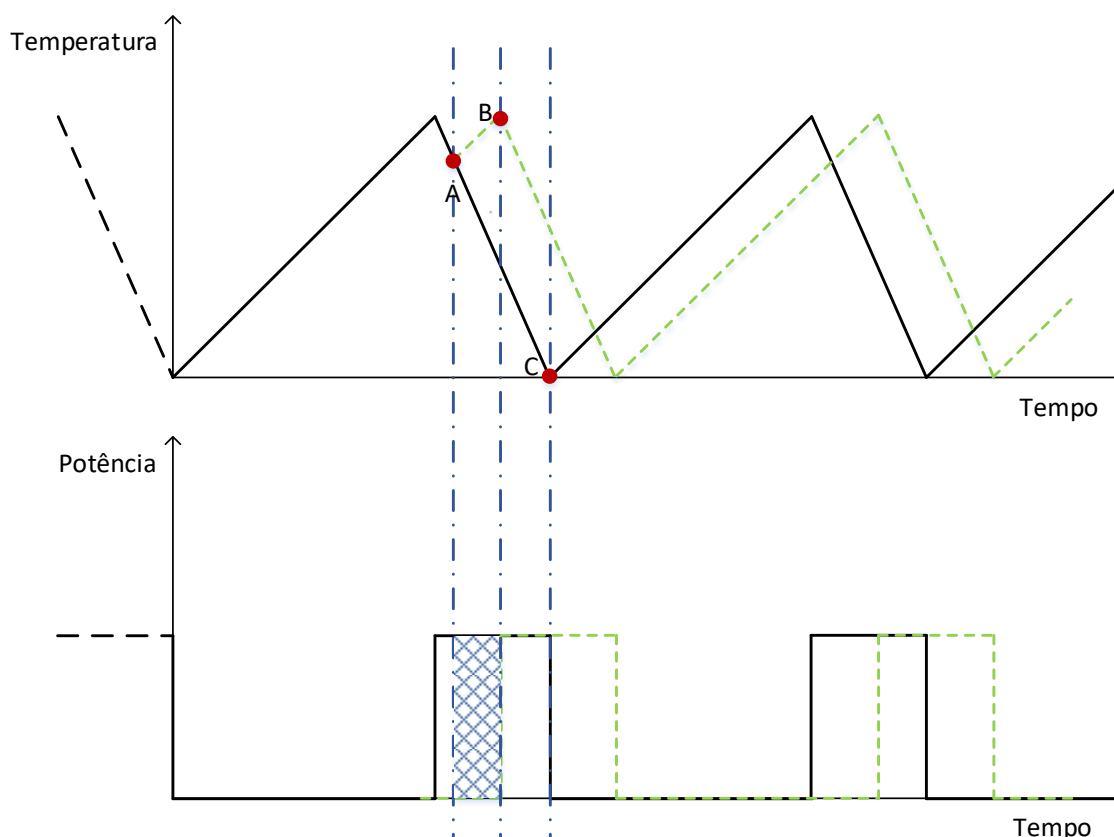


Figura 3.7 – Cálculo da flexibilidade no frigorífico – Caso 2. Representação da variação da temperatura interior do frigorífico (em cima), e do estado do compressor (em baixo). A preto o funcionamento normal do frigorífico, e a tracejado verde o funcionamento alterado.

Na Figura 3.7 está presente o caso em que o instante onde o frigorífico é desligado (Ponto A - Figura 3.7), faz com que o instante onde a temperatura atinge novamente o limite máximo (Ponto B - Figura 3.7) ocorra antes do instante onde, no funcionamento normal, a temperatura atingiria o limite mínimo (Ponto C - Figura 3.7). O funcionamento do frigorífico pode então ser alterado no intervalo desde o ponto A ao ponto B, sendo essa a duração de flexibilidade resultante. A área a sombreado, no gráfico do estado do funcionamento do compressor da Figura 3.7, representa a energia que pode não ser consumida. O período é limitado pelo ponto B, visto que a partir desse instante o frigorífico terá de voltar a entrar em funcionamento para manter a temperatura dentro dos limites definidos.

Em suma existem duas situações a ter em conta no cálculo da flexibilidade: i) o caso em que o instante onde a temperatura atinge novamente o limite máximo, após o frigorífico ser desligado, ocorre depois do instante onde a temperatura atingiria o limite mínimo no funcionamento normal do frigorífico (Figura 3.6); ii) o caso onde esse instante antecede o instante do limite mínimo da temperatura no funcionamento normal do frigorífico (Figura 3.7).

### 3.4.2. Agregada

A flexibilidade agregada consiste na combinação da flexibilidade individual resultante de vários dispositivos (para um dado instante cada dispositivo pode oferecer diferentes valores de flexibilidade). Assim, somando os valores de flexibilidade de cada dispositivo resulta num agregado de flexibilidade para esse instante. Na perspectiva de um período, ao aglomerar todos esses valores individuais de cada instante ao longo do mesmo, resulta na flexibilidade agregada de um conjunto de dispositivos ao longo de um determinado intervalo de tempo. Supondo um conjunto de frigoríficos, num determinado instante do dia irão encontrar-se em estados de funcionamento distintos, o que resulta em diferentes valores de flexibilidade para cada um nesse instante. Ao aglomerar todos esses valores individuais em cada instante num determinado período, resulta num valor conjunto de flexibilidade que os frigoríficos podem oferecer em cada instante ao longo desse período.

A medição da flexibilidade agregada tem interesse no sentido em que fornece a informação relativa a um instante do dia de um conjunto de dispositivos, e não apenas de um isolado. Desta forma, num determinado instante do dia é calculada a flexibilidade para cada frigorífico, de acordo com o seu funcionamento naquele instante, sendo esse o instante inicial do cálculo. Resultam assim casos onde existem frigoríficos que não podem oferecer qualquer flexibilidade, devido a estarem na fase de aquecimento, e outros que oferecem mais ou menos flexibilidade dependendo da zona na fase de arrefecimento onde se encontram na altura em que podem ser desligados.

### 3.4.3. Método de Cálculo

Como forma de implementar a metodologia de cálculo da flexibilidade energética desenvolvida, foi utilizada a ferramenta de *software* Matlab. Na Figura 3.8 é apresentado um esquema auxiliar de modo a explicitar a metodologia desenvolvida. Inicialmente é calculada a temperatura interna do frigorífico a partir do ponto onde é pretendido calcular a flexibilidade, mais concretamente, a partir do instante onde o frigorífico é desligado, com a finalidade de obter todas as temperaturas até atingir o limite máximo  $T_{max}$  (as temperaturas da fase de aquecimento do funcionamento alterado). Após obter a nova curva de temperaturas, verifica-se se o instante onde é atingindo  $T_{max}$  é maior que o instante onde era atingido  $T_{min}$  no funcionamento normal. Caso se verifique, o instante onde o compressor volta a ser ligado é substituído pelo instante onde no funcionamento normal atingiria o limite mínimo. Isto deve-se ao fato de nessa situação o instante onde o máximo é novamente atingido ocorrer numa fase onde o frigorífico já estaria desligado no seu funcionamento normal. Caso o instante onde  $T_{max}$  é atingido seja antes do instante onde no funcionamento normal era atingido  $T_{min}$ , mantém-se o instante onde o compressor é ligado no funcionamento alterado. Assim, o cálculo da duração da flexibilidade é feito através da diferença entre o instante em que o frigorífico foi desligado e o instante onde voltou a entrar em funcionamento.

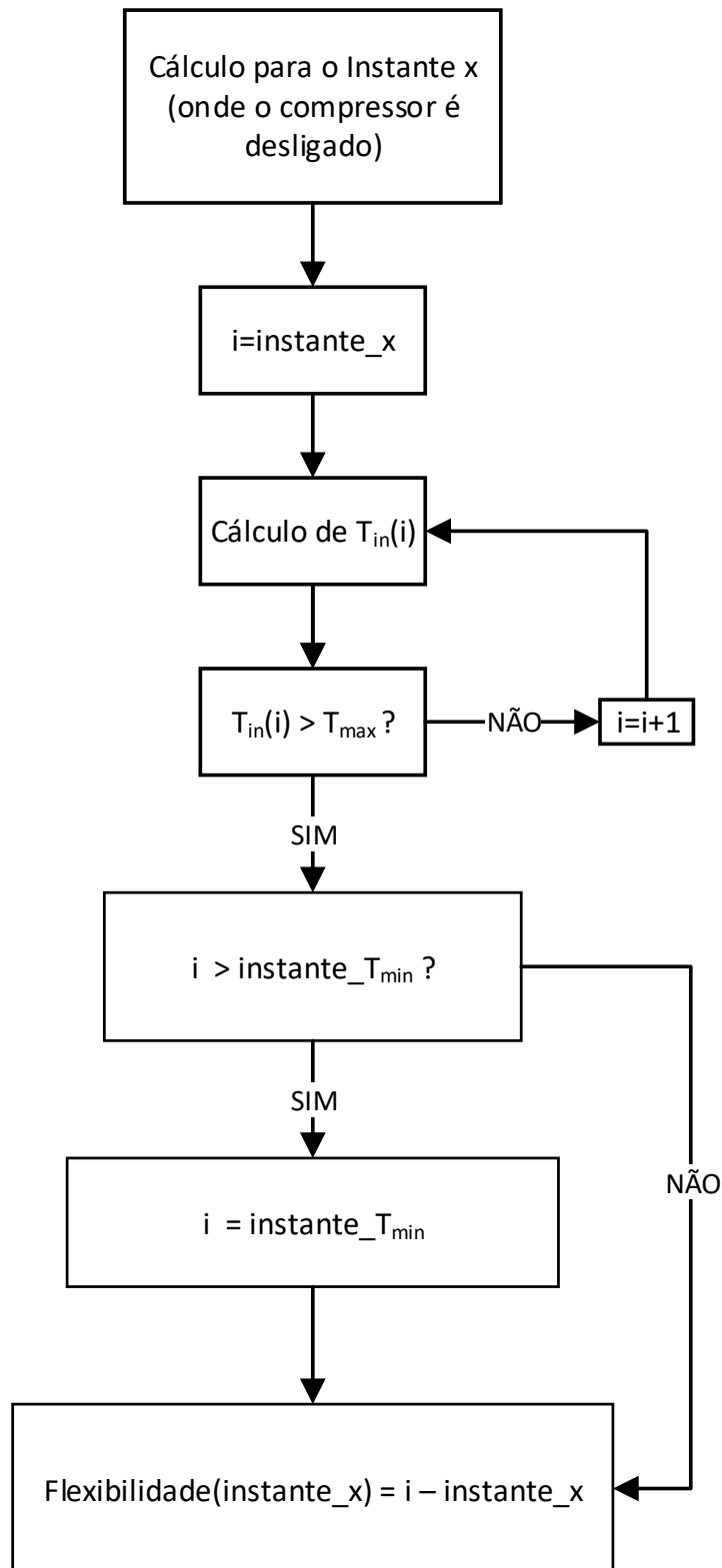


Figura 3.8 – Esquema ilustrativo da metodologia desenvolvida para o cálculo da flexibilidade energética.

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS E ANÁLISE

Este capítulo descreve as simulações realizadas a partir da metodologia de cálculo da flexibilidade desenvolvida no capítulo anterior. Inicialmente é descrito o caso de estudo de modo geral e define-se as condições iniciais do modelo onde assentam as simulações realizadas. A análise da flexibilidade engloba tanto a perspectiva individual como a agregada. Primeiramente efetuaram-se as simulações referentes à flexibilidade individual, o que corresponde à aplicação da metodologia a um frigorífico. Seguidamente procedeu-se ao estudo da flexibilidade agregada, analisando a duração da flexibilidade e posteriormente a flexibilidade. Por último, de forma a avaliar a metodologia desenvolvida, os referidos resultados são analisados tendo em conta os pressupostos referidos no subcapítulo 3.4.

### 4.1. Caso de Estudo

O caso de estudo definido é o frigorífico e tem como objetivo a análise da sua flexibilidade energética, utilizando a combinação do seu modelo de funcionamento com a metodologia de cálculo da flexibilidade desenvolvida. O modelo de funcionamento do frigorífico foi implementado através de uma representação matemática de forma a modelar o seu funcionamento, nomeadamente, a variação da temperatura no seu interior e o respetivo estado do compressor, tal como apresentado em detalhe no capítulo 3. A metodologia de cálculo da flexibilidade permite representar a flexibilidade que o dispositivo oferece. De forma a estudar o comportamento do frigorífico nas diversas situações foram realizadas várias simulações, divididas em dois subcapítulos, onde numa primeira parte se abordou a flexibilidade de forma individual (subcapítulo 4.2) e depois de forma agregada (subcapítulo 4.3).

As simulações realizadas no subcapítulo 4.2 demonstram a aplicação da metodologia de cálculo da flexibilidade em apenas um frigorífico, considerando três casos onde o cálculo é efetuado e os respetivos resultados são analisados. Por fim, é ainda apresentado o resultado do cálculo da duração de flexibilidade para diferentes instantes do funcionamento do frigorífico.

Na Tabela 4.1 estão apresentados os valores dos parâmetros assumidos para o modelo do frigorífico nas simulações realizadas no subcapítulo 4.2.

*Tabela 4.1 – Parâmetros do modelo do frigorífico nas simulações do subcapítulo 4.2.*

Parâmetro	Símbolo	Valor
Condutividade Térmica (W/m°C)	A	3,21
Intervalo de tempo entre temperaturas (min)	$\tau$	1
Massa térmica (kWh/°C)	$m_c$	12,05
Potência Compressor (W)	$q_i$	70
Coeficiente de Performance	$\eta$	3,0
Temperatura Ambiente (°C)	$T_{amb}$	25
Temperatura Máxima (°C)	$T_{max}$	8
Temperatura Mínima (°C)	$T_{min}$	3
Temperatura Inicial Simulação (°C)	$T_{in}$	8

No subcapítulo 4.3 são apresentados os resultados das simulações realizadas para o cálculo da flexibilidade agregada. Foram realizadas simulações considerando um conjunto de 6 e de 4 milhões de frigoríficos. As simulações iniciais consideram apenas 6 frigoríficos, de modo a analisar mais facilmente os resultados de um conjunto de frigoríficos. Ainda considerando um conjunto de 6 frigoríficos foram realizadas simulações variando os parâmetros do funcionamento dos frigoríficos, nomeadamente, o estado inicial do compressor e a temperatura interna inicial. Desta forma é possível incutir um comportamento desfasado, aproximando assim os casos simulados de uma situação que melhor represente a realidade. Para as simulações com um conjunto de 4 milhões de frigoríficos, primeiramente foi considerado a temperatura inicial e o estado inicial do compressor aleatórios. Em seguida foi adicionada a variação da potência de cada frigorífico entre os valores de 70 e 140 W, bem como a massa térmica entre 7,9 e 32 kWh/°C. Através da variação dos parâmetros mencionados é possível simular um conjunto de frigoríficos diversificado e com comportamentos distintos, resultando assim numa situação mais próxima do real. Os valores dos parâmetros assumidos para o modelo do frigorífico nas simulações de 6 e 4 milhões de frigoríficos, apresentadas no subcapítulo 4.3.1, estão presentes na Tabela 4.2 e para as simulações de 4 milhões de frigoríficos no subcapítulo 4.3.2 na Tabela 4.3.



*Tabela 4.2 – Parâmetros do modelo do frigorífico nas simulações com 6 e 4 milhões de frigoríficos do subcapítulo 4.3.1.*

Parâmetro	Símbolo	Valor
Condutividade Térmica (W/m°C)	A	3,21
Intervalo de tempo entre temperaturas (min)	$\tau$	1
Massa térmica (kWh/°C)	$m_c$	12,05
Potência Compressor (W)	$q_i$	70
Coeficiente de Performance	$\eta$	3,0
Temperatura Ambiente (°C)	$T_{amb}$	25
Temperatura Máxima (°C)	$T_{max}$	8
Temperatura Mínima (°C)	$T_{min}$	3
Temperatura Inicial de Simulação (°C)	$T_{in}$	3-8

*Tabela 4.3 – Parâmetros do modelo do frigorífico nas simulações com 4 milhões de frigoríficos do subcapítulo 4.3.2.*

Parâmetro	Símbolo	Valor
Condutividade Térmica (W/m°C)	A	3,21
Intervalo de tempo entre temperaturas (min)	$\tau$	1
Massa térmica (kWh/°C)	$m_c$	7,9 – 32
Potência Compressor (W)	$q_i$	70 – 140
Coeficiente de Performance	$\eta$	3,0
Temperatura Ambiente (°C)	$T_{amb}$	25
Temperatura Máxima (°C)	$T_{max}$	8
Temperatura Mínima (°C)	$T_{min}$	3
Temperatura Inicial de Simulação (°C)	$T_{in}$	3-8

## 4.2. Flexibilidade Individual

No presente subcapítulo são apresentados os resultados do cálculo da flexibilidade individual para os diferentes casos simulados. Nas Figuras 4.1 - 4.3 está representada a variação da temperatura interna do frigorífico em funcionamento normal e a variação depois de ser desligado no instante onde é efetuado o cálculo (funcionamento alterado), bem como o correspondente estado do compressor em ambas as situações de funcionamento. O intervalo temporal considerado são 140 minutos, o que corresponde a um intervalo genérico ao longo de um dia. O resultado do cálculo é apresentado com a duração da flexibilidade obtida e a potência correspondente (neste caso é apenas considerado um frigorífico pelo que a potência disponível será apenas a de um frigorífico (70 W)).

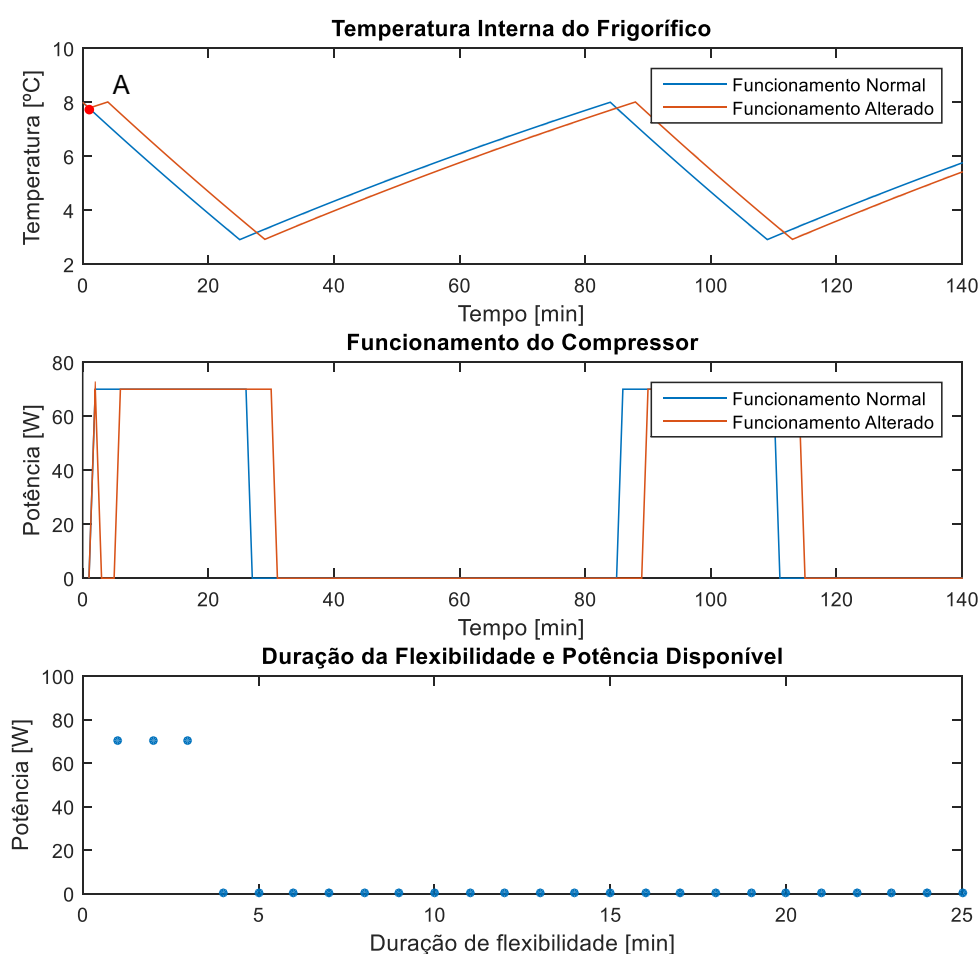


Figura 4.1 – Flexibilidade de um frigorífico desligado num instante inicial da fase de arrefecimento. Duração da flexibilidade (em baixo), variação da temperatura interior (em cima) e o estado do compressor (no meio) para o funcionamento normal (a azul) e alterado (a laranja).

Na Figura 4.1 é apresentado o caso em que o cálculo da flexibilidade é realizado para um instante no início da fase de arrefecimento, isto é, pouco tempo depois de o compressor entrar em funcionamento o frigorífico é desligado. Tendo em conta o instante onde o frigorífico é desligado, a temperatura ainda se encontra relativamente próxima do limite máximo, tal como

podemos observar no início do funcionamento alterado no gráfico da variação da temperatura interna (Figura 4.1). Assim, a duração da flexibilidade resultante será reduzida, visto que ao desligarmos o frigorífico pouco tempo depois de o compressor ter entrado em funcionamento, a temperatura começa a subir atingindo de novo o limite máximo em relativamente pouco tempo. Para este caso, o frigorífico pode ser desligado durante 3 minutos a partir do instante considerado (Ponto A – Figura 4.1), sendo esta a duração da flexibilidade.

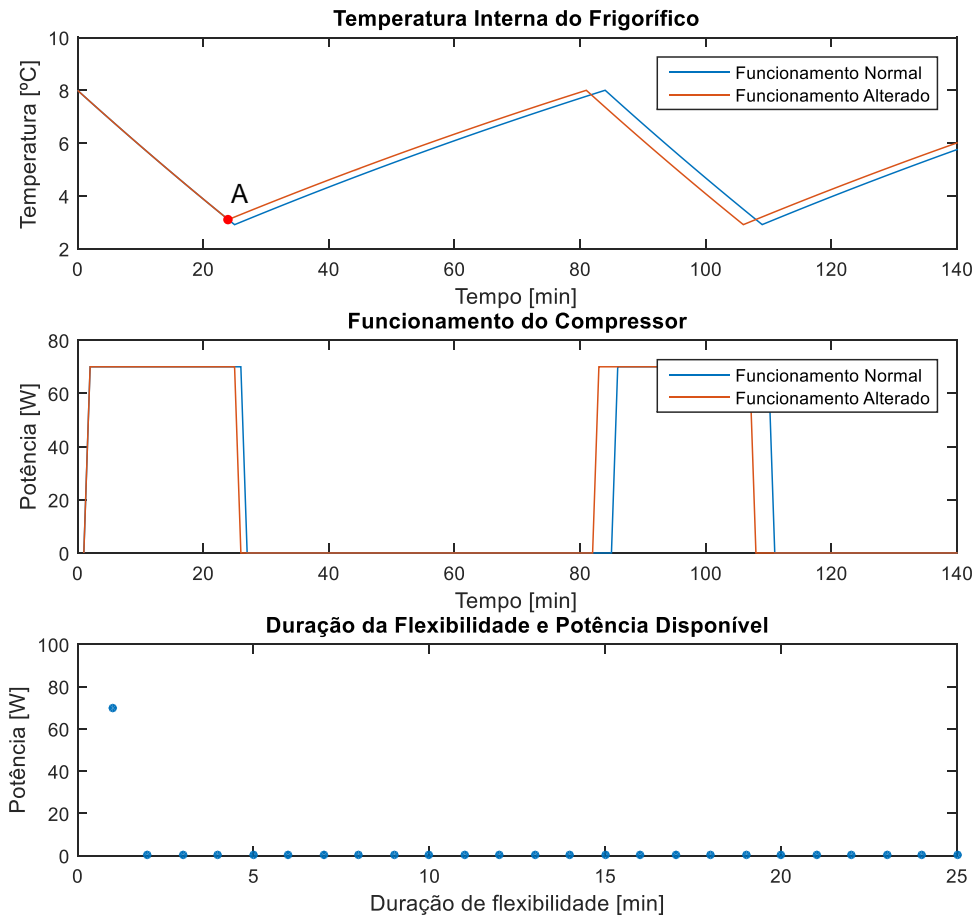
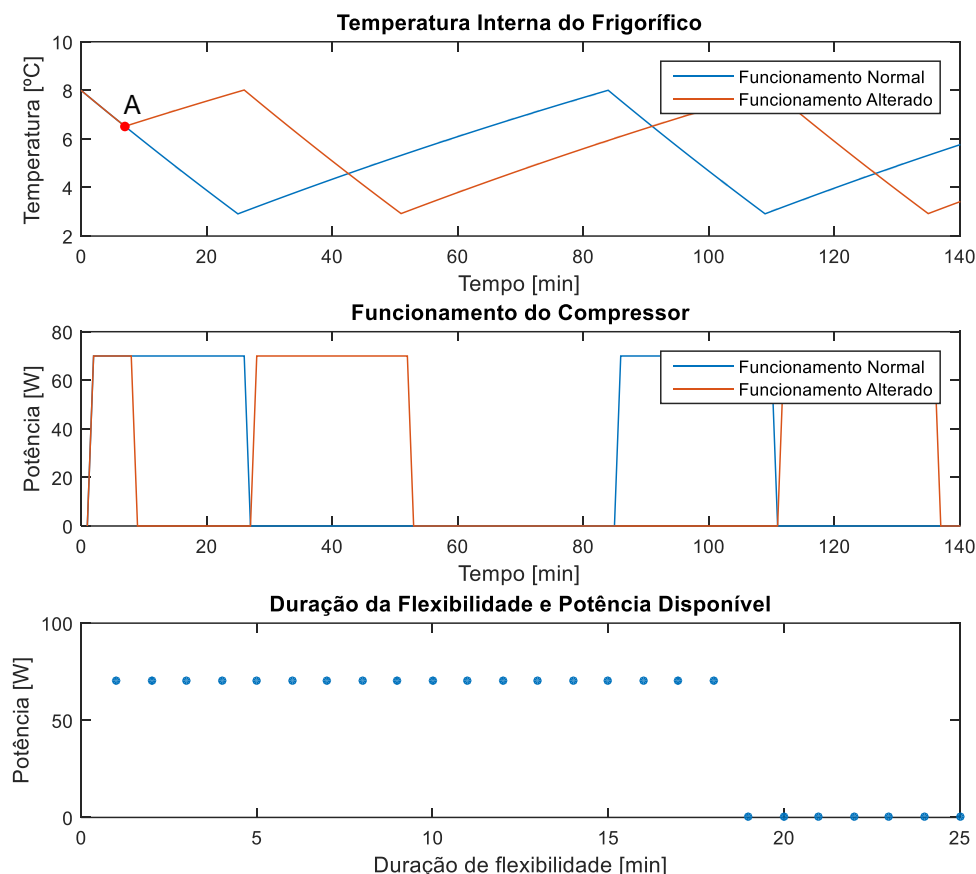


Figura 4.2 – Flexibilidade de um frigorífico desligado num instante final da fase de arrefecimento. Duração da flexibilidade (em baixo), variação da temperatura interior (em cima) e o estado do compressor (no meio) para o funcionamento normal (a azul) e alterado (a laranja).

Para o caso presente na Figura 4.2, o instante onde o frigorífico é desligado situa-se próximo do final da fase de arrefecimento (Ponto A - Figura 4.2), ou seja, do instante onde o compressor é desligado no funcionamento normal. A duração de flexibilidade resultante é muito reduzida nesta situação, 1 minuto, visto que o frigorífico é desligado num instante muito próximo de onde já iria estar normalmente desligado, e por isso mesmo não oferece uma flexibilidade significativa.

Em cima encontram-se as simulações dos dois casos limites do cálculo da flexibilidade. Posto isto, pode ser verificado que ao desligar o frigorífico num instante onde a temperatura ainda não desceu o suficiente, leva a uma duração de flexibilidade reduzida (Figura 4.1), bem

como ao desligar próximo de um instante onde no funcionamento normal já iria estar desligado (Figura 4.2). Observa-se um padrão no cálculo da flexibilidade, onde a duração da mesma será menor quando o frigorífico é desligado em instantes que se situem próximos dos limites da temperatura estabelecidos. De seguida é analisado o resultado para a simulação numa zona mais afastada dos limites de temperatura.



*Figura 4.3 – Flexibilidade de um frigorífico desligado num instante da fase de arrefecimento. Duração da flexibilidade (em baixo), variação da temperatura interior (em cima) e o estado do compressor (no meio) para o funcionamento normal (a azul) e alterado (a laranja).*

Analisando a Figura 4.3, pode ser concluído que há um aumento significativo na duração da flexibilidade obtida, em comparação com os casos anteriores ( Figura 4.1 e Figura 4.2). Nesta situação o frigorífico foi desligado num instante ao longo da fase de arrefecimento (Ponto A - Figura 4.3), afastado dos limites da temperatura. A variação da temperatura no funcionamento alterado atinge o limite máximo muito próximo do instante onde no funcionamento normal atingiria o limite mínimo. Como expectável, verifica-se uma maior duração de flexibilidade em relação aos casos limite anteriores.

Em seguida, efetuou-se uma simulação de forma a obter a representação da duração de flexibilidade para todos os instantes. Foi considerado apenas o primeiro ciclo de funcionamento de um frigorífico, iniciando-se o cálculo quando a temperatura interior atingiu o limite máximo num instante genérico do dia simulado. A duração de flexibilidade foi calculada durante

todos os instantes da fase de arrefecimento de um ciclo de funcionamento (desligando o frigorífico em todos os instantes dessa fase), Figura 4.4. De notar que este cálculo é isolado para cada instante e tendo em conta que a flexibilidade não é usada em nenhum dos instantes.

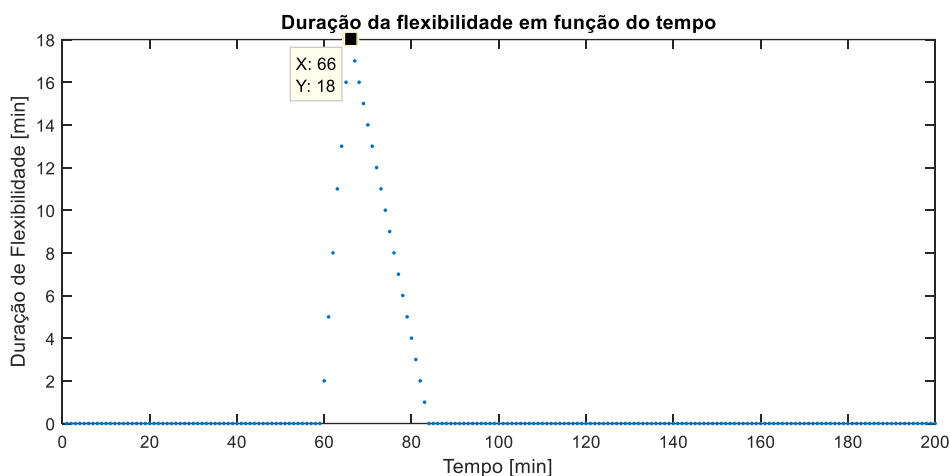


Figura 4.4 – Duração da flexibilidade correspondente a cada instante onde o frigorífico pode ser desligado.

Pode ser observado pela Figura 4.4 que, tal como já referido, junto aos limites da temperatura a duração de flexibilidade será reduzida, pois tanto no início como no fim da fase de arrefecimento obtemos os menores valores da duração. À medida que o instante onde o frigorífico é desligado avança na fase de arrefecimento, ou seja, após a temperatura ter reduzido alguns graus ( $^{\circ}\text{C}$ ), a duração aumenta até um máximo. Ultrapassando o valor máximo, a duração começa a reduzir até atingir novamente um mínimo, visto que volta a entrar numa zona próxima de um limite da temperatura.

### 4.3. Flexibilidade Agregada

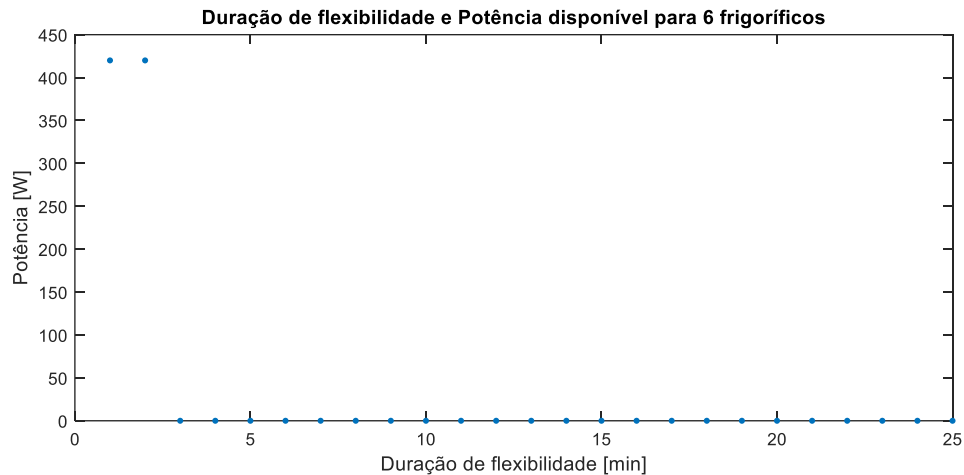
Neste subcapítulo são apresentados os resultados referentes às simulações realizadas para o cálculo da flexibilidade agregada, como tal é considerado um conjunto de frigoríficos em funcionamento. À semelhança do subcapítulo 4.2, são abordados diferentes casos demonstrativos do comportamento dos frigoríficos, de modo a representar a flexibilidade obtida em instantes distintos e como esta varia em função dos mesmos.

#### 4.3.1. Análise da Duração de Flexibilidade

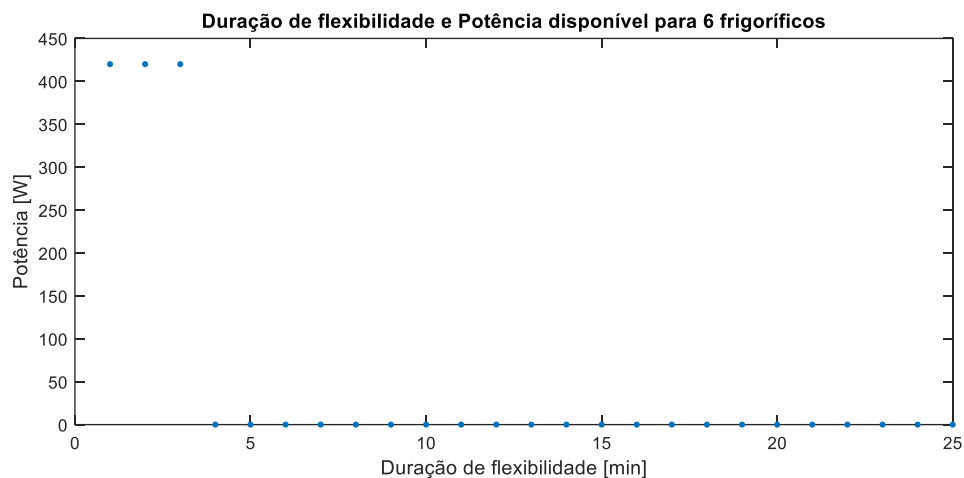
Inicialmente foi analisada a duração de flexibilidade para um conjunto de 6 frigoríficos, considerando que o cálculo da flexibilidade é realizado num único instante genérico de simulação. Foram consideradas diferentes situações de funcionamento dos frigoríficos no instante onde são desligados, de modo a representar os casos já abordados no cálculo da flexibilidade individual. Bem como situações onde os parâmetros do estado inicial do compressor e da temperatura interna inicial são aleatórios. As Figura 4.5 - 4.9 apresentam os resultados referentes

ao cálculo para 6 frigoríficos, evidenciando as diferenças entre flexibilidade individual e agregada. Na Figura 4.10 está presente o resultado do cálculo para um conjunto de 4 milhões de frigoríficos.

### **Análise da duração da flexibilidade em diferentes instantes para 6 frigoríficos em funcionamento síncrono**



*Figura 4.5 – Duração da flexibilidade para 6 frigoríficos desligados próximo do instante do limite de temperatura mínima.*



*Figura 4.6 – Duração da flexibilidade para 6 frigoríficos, desligados no instante do limite de temperatura máxima.*

Considerando um conjunto de 6 frigoríficos a funcionar em simultâneo, são apresentados nas Figura 4.5 e 4.6 os resultados obtidos para a duração de flexibilidade nos casos limites, isto é, quando o instante onde os frigoríficos são desligados se situa próximo dos limites de temperatura. Em ambos os casos é considerado que os 6 frigoríficos funcionam nas mesmas condições, ou seja, no instante onde são desligados todos estão na mesma zona de funcionamento. Na Figura 4.5, o cálculo é realizado considerando que no instante onde os frigoríficos são desligados, todos estão próximos do limite mínimo de temperatura (3 °C) e por isso a dura-

ção de flexibilidade obtida é reduzida. Já na Figura 4.6, os frigoríficos encontram-se próximos do limite máximo de temperatura (8 °C) quando são desligados. A duração de flexibilidade resultante é reduzida, tal como no caso apresentado na Figura 4.1 (no subcapítulo 4.2), contudo neste caso a potência disponível é superior pois estão 6 frigoríficos em funcionamento, logo a potência disponível resulta da contribuição do agregado (420 W, visto que cada frigorífico tem uma potência de 70 W). Considerando ainda os 6 frigoríficos a funcionar nas mesmas condições e em simultâneo, foi simulado o caso em que são desligados num instante ao longo da fase de arrefecimento, apresentado na Figura 4.7. Neste caso a duração de flexibilidade é superior relativamente aos casos anteriores, tal como verificado no caso presente na Figura 4.3 (no subcapítulo 4.2).

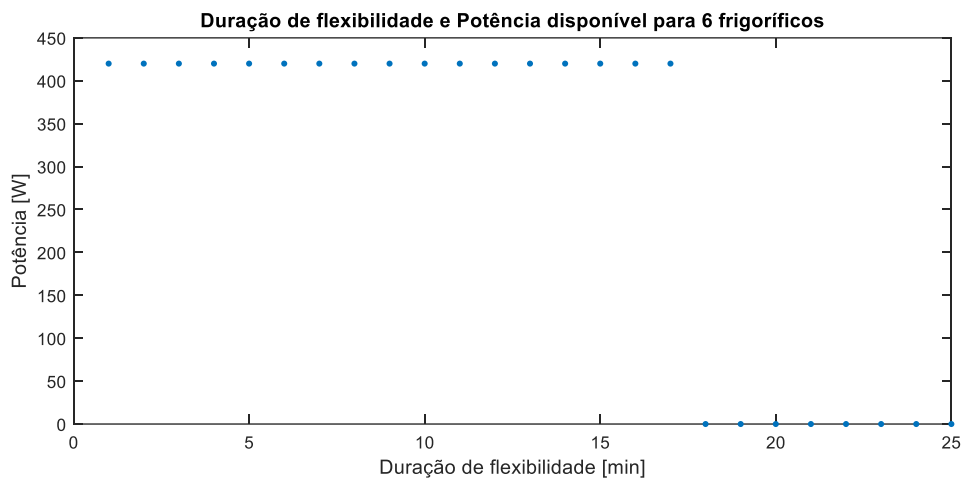


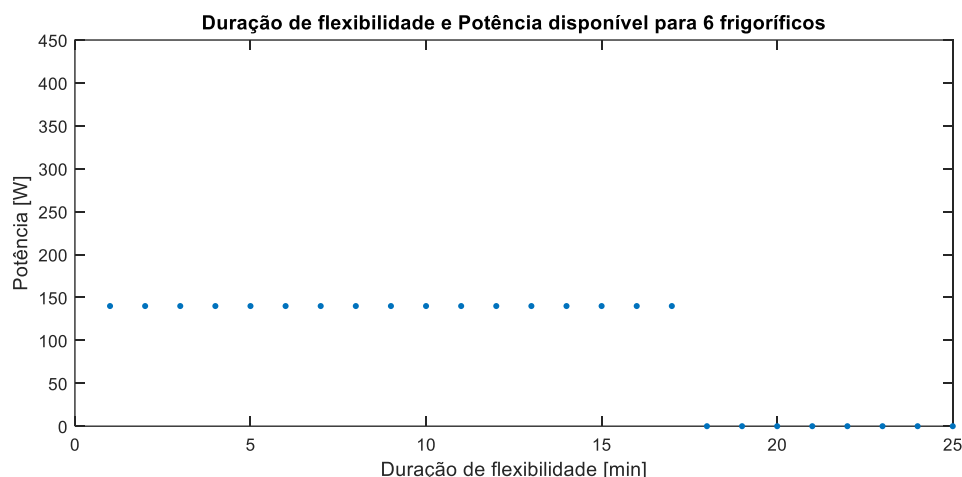
Figura 4.7 – Duração da flexibilidade para 6 frigoríficos, desligados num instante intermédio da fase de arrefecimento.

Posto isto, pode ser observado que a duração de flexibilidade agregada em comparação com a duração individual não sofre qualquer influência perante o aumento do número de dispositivos. Em relação à potência disponível, sendo este um fator que depende do número de frigoríficos, quanto maior for o aglomerado maior será a potência que poderá estar disponível.

Os casos demonstrados anteriormente consideram apenas situações ideais, sendo que os frigoríficos estavam todos na mesma fase de funcionamento e nas mesmas condições, resultando num valor da potência disponível igual ao total do aglomerado, o que poderá não corresponder à realidade. Por exemplo, supondo um conjunto de frigoríficos de uma dada região, cada um estará em fases de funcionamento distintas ao longo de um dia visto que iniciaram o seu funcionamento em instantes diferentes e possuem distintos parâmetros de funcionamento. Adicionalmente existem outros fatores externos que provocam alterações no funcionamento, tais como as aberturas de porta e os alimentos no interior. Logo, num determinado instante do dia enquanto uns podem oferecer flexibilidade, outros não o poderão fazer e a duração de flexibilidade será diferente para cada frigorífico. Desta forma, para aproximar as simulações de casos reais foram introduzidas variações nos parâmetros de cada frigorífico, para que cada um tenha o seu comportamento próprio.

### **Análise da duração da flexibilidade para 6 frigoríficos com o estado inicial do compressor aleatório**

A Figura 4.8 corresponde ao caso apresentado na Figura 4.7, com a diferença que o estado inicial do compressor foi considerado de forma aleatória, fazendo assim com que os 6 frigoríficos se encontrem em fases de funcionamento diferentes no instante onde são desligados. Assim é possível colocar os frigoríficos em funcionamentos distintos e desfasados ao longo do período de simulação.



*Figura 4.8 – Duração da flexibilidade para 6 frigoríficos, com estado inicial do compressor aleatório no instante onde são desligados.*

Pode ser verificado através da Figura 4.8 que, em comparação com o resultado obtido na Figura 4.7, a potência disponível é menor (140 W). Sendo que, apenas dois frigoríficos se encontram em funcionamento no instante onde são desligados, devido ao padrão aleatório de variação do estado inicial do compressor.

### **Análise da duração da flexibilidade para 6 frigoríficos com a temperatura interna inicial e estado do compressor aleatórios**

Para o caso presente na Figura 4.9 além do estado do compressor, a temperatura inicial de cada frigorífico também é aleatória. Isto é, o funcionamento de cada frigorífico está desfasado, pois para o intervalo de simulação considerado cada um tem uma temperatura diferente no início da simulação. Assim, existem frigoríficos que se podem encontrar na fase de aquecimento não oferecendo flexibilidade e outros na fase de arrefecimento que podem oferecer. O parâmetro foi considerado com uma variação aleatória entre os valores de 3 e 8 °C. O resultado demonstra que, contrariamente aos casos anteriores, a potência disponível é relativamente mais baixa, visto que nem todos os frigoríficos estão a funcionar no instante em que a flexibilidade é calculada. Já a duração de flexibilidade resultante é diferente para cada frigorífico, tendo em conta que cada um tem uma temperatura inicial diferente.



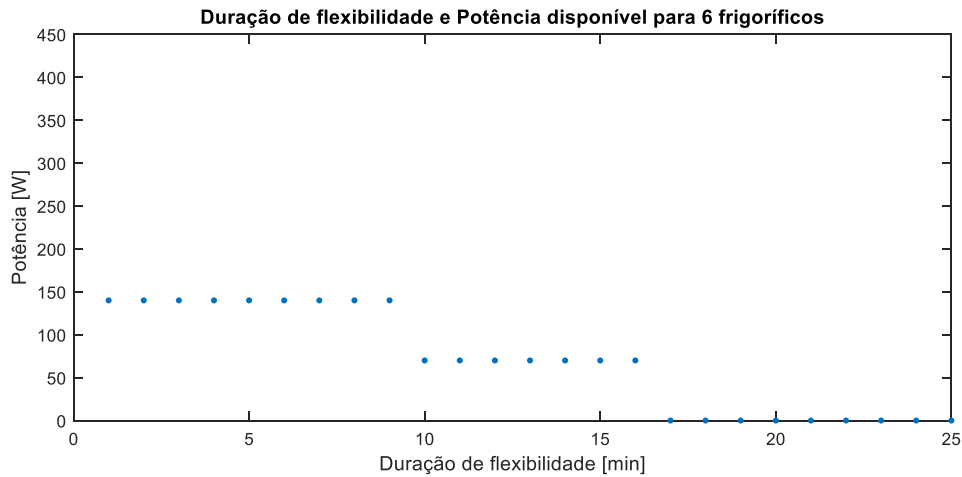


Figura 4.9 – Duração da flexibilidade para 6 frigoríficos, com temperatura inicial e estado inicial do compressor aleatórios.

### Análise da duração da flexibilidade para 4 milhões de frigoríficos com a temperatura interna inicial e estado do compressor aleatórios

As simulações anteriores consideravam um número de frigoríficos reduzido, de forma a ser mais simples a análise dos diferentes casos em estudo. Contudo, no presente caso de estudo pretende-se avaliar a flexibilidade agregada a nível habitacional e de acordo com o panorama nacional. Em Portugal existem cerca de 4 milhões de equipamentos de frio, combinando frigoríficos com e sem congelador e combinados nas habitações [9]. Foi então assumida uma aproximação de 4 milhões, como sendo o número de frigoríficos a simular.

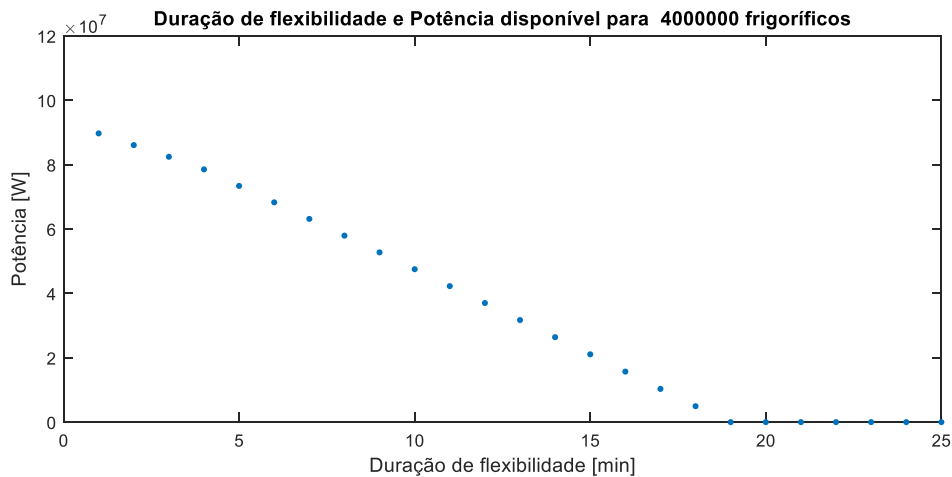


Figura 4.10 – Duração da flexibilidade para 4 milhões de frigoríficos, com temperatura inicial e estado inicial do compressor aleatórios.

Na Figura 4.10 encontra-se o resultado obtido da simulação, considerando a temperatura inicial e o estado inicial de funcionamento do compressor aleatórios. Em comparação com a Figura 4.9, a potência disponível é bastante superior visto que o número de frigoríficos simulados é muito maior. A potência disponível atinge um valor máximo próximo de 90 MW o que corresponde a aproximadamente um terço do valor máximo possível de 280 MW (supondo que

os 4 milhões de frigoríficos têm uma potência de 70 W e se encontram todos em funcionamento). Pode ser verificado que a potência disponível decresce à medida que aumenta a duração de flexibilidade, tal facto era expectável sendo este um caso mais próximo do real, onde cada frigorífico tem um funcionamento distinto. Em suma, as simulações apresentadas demonstram a duração da flexibilidade e a respetiva potência disponível para as diferentes variações do caso de estudo.

#### **4.3.2. Análise da Flexibilidade**

Nos capítulos anteriores a análise da flexibilidade foi realizada considerando apenas um instante genérico. Contudo, o modelo de funcionamento do frigorífico permite prever o seu comportamento ao longo de um período de simulação pré-definido. Assim, neste subcapítulo os resultados obtidos estão em função do período de simulação, com a duração de flexibilidade calculada e a potência disponível correspondente a cada instante. Posto isto, a informação devolvida do cálculo refere-se a uma previsão da flexibilidade, a partir do instante onde é iniciada a simulação até ao final do período definido. Foram realizadas simulações para o conjunto de 4 milhões frigoríficos, onde foi calculada a flexibilidade para todos os instantes ao longo do período definido, considerando sempre que a flexibilidade não é utilizada e é independente do instante anterior. Isto é, o cálculo da flexibilidade é realizado de forma independente para todos os instantes do período de simulação considerado (60 minutos), em que cada frigorífico é desligado, caso se aplique, em cada instante de tempo (1 minuto) ao longo de todo o período de simulação.

Foram simuladas diferentes situações, inicialmente com os parâmetros iniciais da temperatura e do estado inicial do compressor aleatórios, depois foi adicionada a variação no valor da potência atribuído a cada frigorífico, e por fim adicionada a variação da massa térmica. As simulações foram realizadas após um período de funcionamento dos frigoríficos de 24 horas. Terminada a simulação inicial, os parâmetros de cada frigorífico no final das 24 horas são utilizados para a realização do cálculo da flexibilidade ao longo do período de simulação definido (60 minutos). Esta condição inicial foi integrada em cada simulação como forma de ultrapassar possíveis transitórios no funcionamento dos frigoríficos, e evidenciar um comportamento aleatório em função da variação de cada parâmetro.

#### **Análise da flexibilidade em todos os instantes para 4 milhões frigoríficos, com temperatura interna e estado do compressor iniciais aleatórios**

Nesta situação os parâmetros da temperatura interna inicial e do estado do compressor inicial são considerados aleatórios, de forma a incutir um comportamento desfasado no funcionamento dos frigoríficos ao longo do tempo, visto que no início da simulação cada frigorífico estará numa fase de funcionamento distinta. Através da análise da Figura 4.11, pode ser observado que ao longo do período de simulação temos uma distribuição aproximadamente uni-

forme da duração de flexibilidade e da correspondente potência disponível ao longo do tempo. Tal facto deve-se ao funcionamento desfasado dos frigoríficos, pois enquanto uns entram na fase onde não podem oferecer flexibilidade, outros estão a entrar na fase onde podem, e assim sucessivamente. Verifica-se uma tendência da diminuição da potência disponível em função do aumento da duração de flexibilidade.

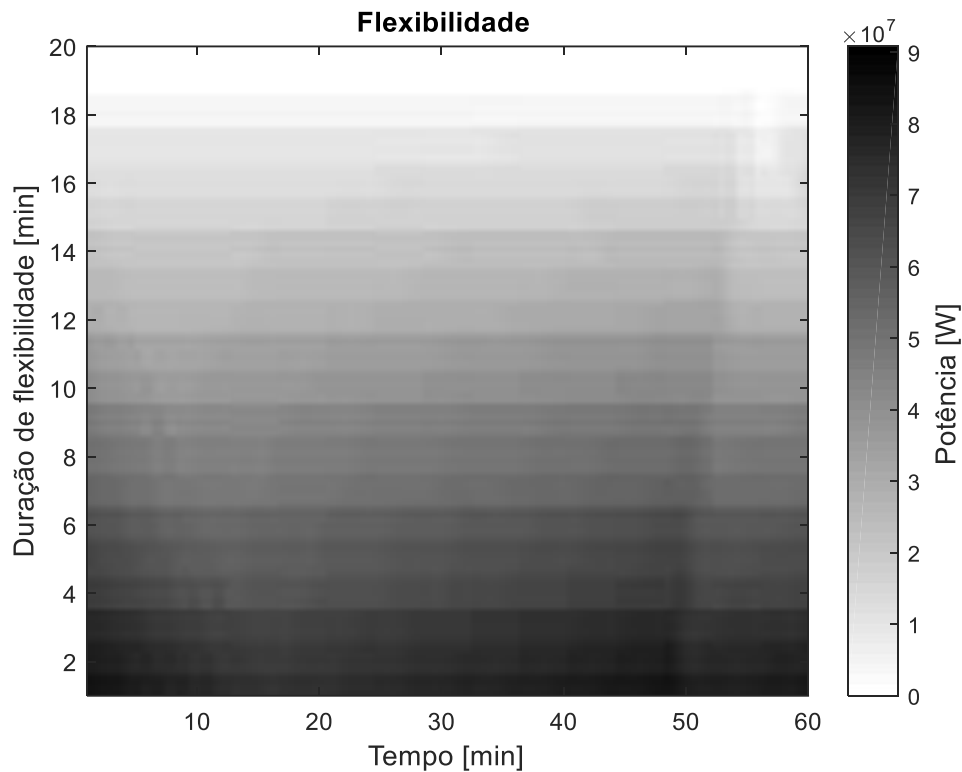


Figura 4.11 – Flexibilidade prevista de 4 milhões de frigoríficos a serem desligados em todos os instante a partir de instante inicial do período de simulação. Considerando que a flexibilidade não é usada.

**Análise da flexibilidade em todos os instantes para 4 milhões de frigoríficos, com temperatura interna e estado do compressor iniciais aleatórios, e potência a variar entre 70 W e 140 W.**

Com base nas condições enunciadas anteriormente (temperatura inicial e estado do compressor aleatório), foi adicionada a variação da potência de cada frigorífico, a alternar entre os valores 70-140 W (com um espaçamento de 10 W). Desta forma é considerado que o conjunto de frigoríficos simulado possui uma diversidade de potências, semelhante ao que está presente na realidade onde existem diferentes modelos com diferentes características. O resultado da simulação é apresentado na Figura 4.12.

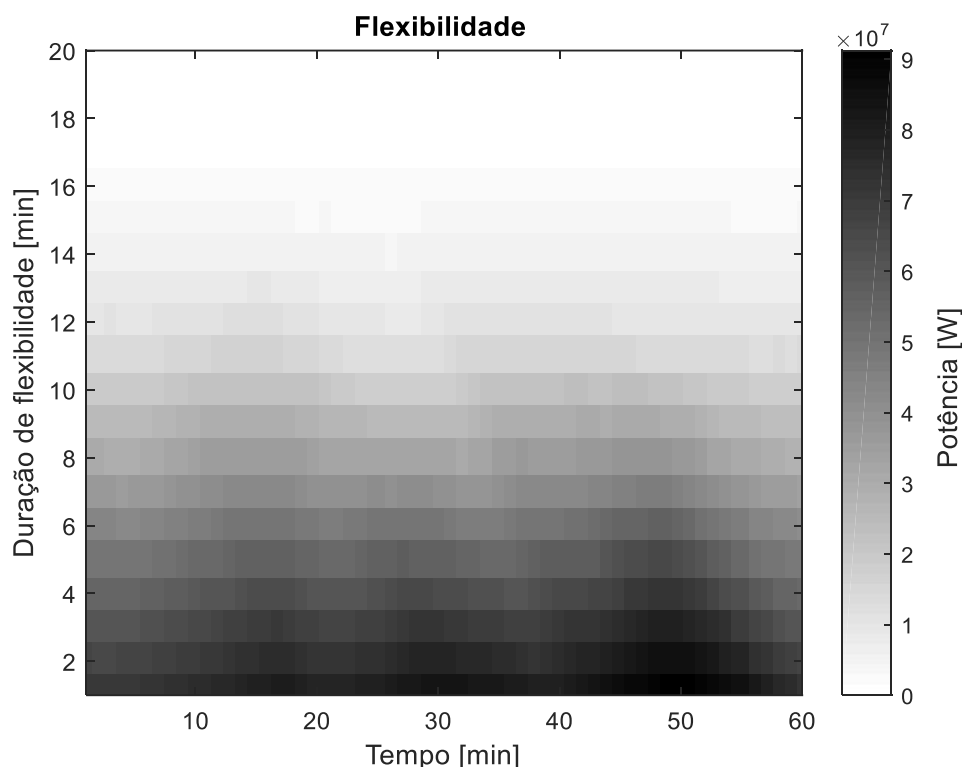


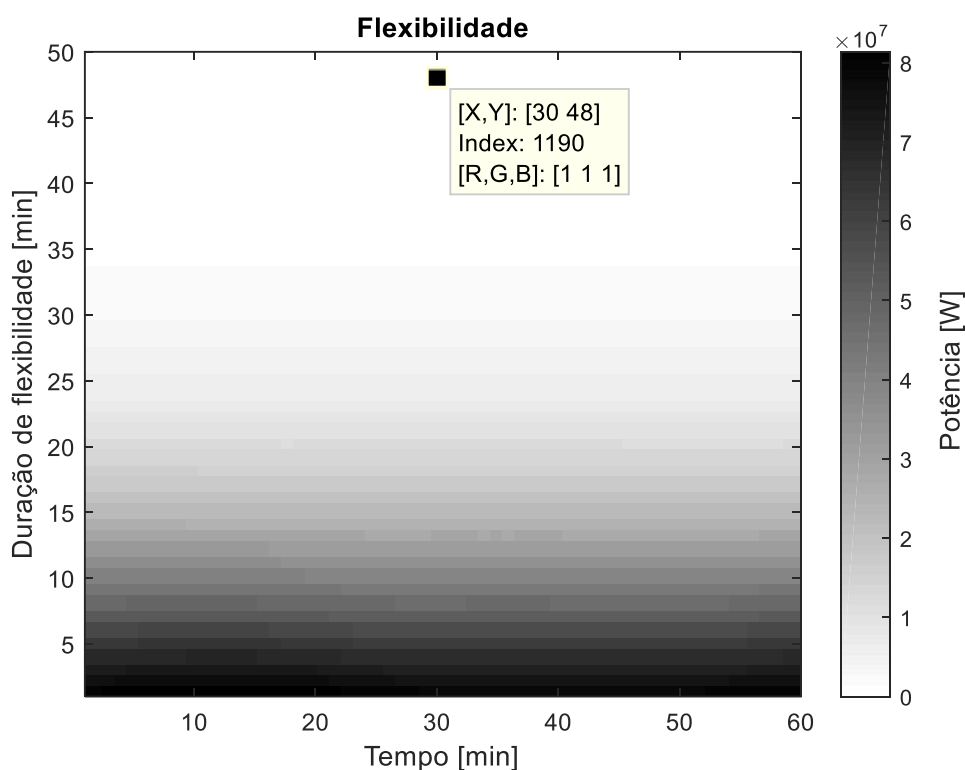
Figura 4.12 – Flexibilidade prevista de 4 milhões de frigoríficos a serem desligados em todos os instante a partir de instante inicial do período de simulação, considerando que a flexibilidade não é usada. A potência de cada frigorífico é aleatória entre 70 W e 140 W.

Pode ser observado pela Figura 4.12 que apesar da duração de flexibilidade se manter semelhante ao caso anterior (Figura 4.11), os valores da potência disponível para os valores superiores da duração de flexibilidade têm uma ordem de grandeza inferior, o que ocorre devido ao valor da potência ter influência direta no funcionamento do frigorífico. Pela equação (3.3) pode ser verificado que na fase de arrefecimento quanto maior o valor da potência mais rápido será o decremento de temperatura. Assim, a duração de flexibilidade irá também reduzir-se, visto que a janela de oportunidade onde o compressor está ligado será menor. Já na fase de aquecimento, pode ser verificado pela equação (3.2) que a potência não tem qualquer influência, visto que o compressor se encontra desligado ( $q_i = 0$ ).

A atribuição dos valores de potência entre 70 e 140 W reflete um aumento da potência individual, para alguns frigoríficos, relativamente ao caso analisado anteriormente. Uma potência individual maior leva a que o frigorífico alcance mais rapidamente o limite inferior de temperatura, o que resulta na redução da duração de flexibilidade oferecida pelo mesmo. Desta forma a potência disponível para durações de flexibilidade maiores é inferior, visto que nem todos os frigoríficos disponibilizam a mesma duração de flexibilidade como no caso anterior. No período simulado, a duração de flexibilidade mantém-se semelhante ao caso anterior devido à existência de alguns frigoríficos com as mesmas características. Em adição, devido ao funcionamento desfasado dos frigoríficos, o aumento da potência individual em alguns frigoríficos não significa o aumento da potência global disponível.

**Análise da flexibilidade em todos os instantes para 4 milhões frigoríficos, com temperatura interna e estado do compressor inicial aleatórios, e potência e massa térmica a variar**

Nesta situação foi considerada a massa térmica de cada frigorífico a variar aleatoriamente entre os valores 7,9 e 32 kWh/°C, em adição às condições anteriores. A massa térmica tem influência na forma de funcionamento do modelo do frigorífico utilizado, fazendo assim com que seja possível incutir na simulação frigoríficos com diferentes comportamentos, aproximando assim o caso simulado ainda mais de um caso real. O resultado da simulação está presente na Figura 4.13.



*Figura 4.13 – Flexibilidade prevista de 4 milhões de frigoríficos a serem desligados em todos os instantes a partir de instante inicial do período de simulação, considerando que a flexibilidade não é usada. A potência de cada frigorífico é aleatória entre, bem como a massa térmica.*

Pode ser observado que em comparação com os casos anteriores, há um aumento significativo na duração de flexibilidade sendo a duração máxima de 48 minutos, contudo devido à reduzida ordem de grandeza da potência disponível, já se encontra numa zona da escala muito próxima de zero. A variação da massa térmica influencia a duração das fases de funcionamento dos frigoríficos, afetando assim a duração de flexibilidade resultante de cada frigorífico. Para valores maiores da massa térmica, o frigorífico armazena mais energia térmica no seu interior o que leva ao aumento da duração das fases, logo há uma janela de oportunidade para desligar o frigorífico maior. Caso contrário, como a duração das fases é menor irá resultar numa janela de oportunidade inferior, ou seja, diminuição da duração de flexibilidade.

Analisando a Figura 4.13 verifica-se uma distribuição da potência uniforme ao longo da duração de flexibilidade. Tal distribuição deriva da influência da variação dos parâmetros do funcionamento dos frigoríficos, isto é, para o número considerado o resultado obtido tende para um valor médio, tanto da duração de flexibilidade como da correspondente potência disponível.

## CAPÍTULO 5

# CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo é apresentada, inicialmente, uma síntese do trabalho desenvolvido, as principais contribuições e conclusões. Seguidamente são referidas algumas melhorias que poderiam ser efetuadas ao presente estudo. Por fim, é apresentado o artigo publicado no âmbito desta dissertação.

### 5.1. Síntese Geral e Contribuições

Devido à incontestável necessidade de reduzir as emissões dos gases com efeito de estufa e melhorar a gestão dos recursos energéticos, surge a procura de soluções mais sustentáveis. Até ao momento, as soluções apresentadas, nomeadamente, a inclusão de fontes de energia renovável no sistema elétrico, podem causar problemas de instabilidade na relação entre a produção e o consumo na rede devido ao seu padrão de produção variável. Sendo por vezes necessário recorrer à produção proveniente de combustíveis fósseis, de modo a satisfazer as necessidades pontuais de procura de energia. Neste contexto, a participação ativa do consumidor doméstico no sistema elétrico através dos equipamentos presentes nas habitações, pode ser parte integrante de uma solução. Estas cargas podem ser utilizadas como serviços de reserva auxiliares de curta duração e resposta imediata, visto que já estão ligadas e síncronas com a rede. Esta solução tem como finalidade suprimir, em parte, algumas falhas e desequilíbrios que possam surgir na rede devido ao padrão imprevisível de produção das fontes renováveis, evitando assim que se recorra de forma tão frequente a fontes de produção provenientes de combustíveis fósseis para solucionar esses problemas. Contudo, para a utilização dos equipamentos presentes nas habitações é necessário obter informações sobre o seu funcionamento, bem como de que forma podem ser energeticamente flexíveis, com o intuito de fornecer um serviço auxiliar à rede. Nesse sentido, nesta dissertação foi desenvolvida uma metodologia de cálculo da flexibilidade energética.

O cálculo da flexibilidade energética permite saber a quantidade de potência que pode ser fornecida ao sistema elétrico por um dispositivo e durante quanto tempo pode durar essa ação (duração de flexibilidade), num dado instante. Tendo em consideração um conjunto de dispositivos, a informação obtida do cálculo resulta na potência disponível e na duração de flexibilidade correspondente do agregado, que está disponível num determinado instante. Assim a metodologia desenvolvida permite obter uma previsão da flexibilidade energética associada a um conjunto de dispositivos, em cada instante de um horizonte de simulação definido. A utilização da flexibilidade energética oferecida por alguns dispositivos elétricos domésticos representa assim parte integrante de uma possível solução, com o intuito de flexibilizar a procura do sector elétrico no geral e assim combater os problemas introduzidos pela geração intermitente de algumas fontes renováveis.

O método desenvolvido foi aplicado ao caso concreto do frigorífico, tendo sido efetuadas diversas simulações, de modo a que os resultados fossem o mais próximo de um caso real. Inicialmente o método foi simulado apenas para um frigorífico de forma a observar o comportamento, o funcionamento e a duração da flexibilidade. Em seguida foram verificados os resultados para um agregado de 6 frigoríficos, mais especificamente, qual o valor de potência disponível e duração de flexibilidade que se poderá oferecer ao sistema. Por fim, efetuaram-se simulações considerando um agregado de 4 milhões de frigoríficos com a variação de diversos parâmetros que influenciam o funcionamento de cada frigorífico, com a finalidade de avaliar quais os efeitos dos referidos parâmetros na flexibilidade resultante. Concluiu-se que a variação da potência de cada frigorífico tem influência direta na duração de flexibilidade, visto que frigoríficos com potências superiores levam menos tempo a arrefecer o interior do frigorífico. Logo, a janela de oportunidade para serem desligados é muito menor, e vice-versa. Em relação à massa térmica, a sua variação influencia também a duração de flexibilidade, visto que quanto maior o seu valor mais energia o frigorífico irá armazenar no seu interior, aumentando assim o tempo que permanece ligado na fase de arrefecimento, e vice-versa. Em suma, os diferentes parâmetros considerados têm grande influência na duração da flexibilidade, visto que afetam diretamente a duração das diferentes fases de funcionamento dos frigoríficos. Em relação ao valor da potência disponível, apenas é influenciado pelo número de frigoríficos, logo quanto mais frigoríficos forem considerados no agregado maior será a potência disponível.

Através das simulações realizadas no subcapítulo 4.3.2, verifica-se a tendência da redução da potência disponível com o aumento da duração de flexibilidade. Tal facto deve-se ao comportamento desfasado dos frigoríficos que faz com que em cada instante estejam em diferentes fases de funcionamento. Isto é, em cada instante existem frigoríficos que simplesmente não oferecem flexibilidade, pois encontram-se na fase de aquecimento e outros que oferecem diferentes valores de flexibilidade em função da zona na fase de arrefecimento em que se situam quando são desligados.

O valor da duração de flexibilidade obtida nas simulações tem uma ordem de grandeza de minutos (menor que uma hora). Nas simulações realizadas sem a variação da massa térmica



ca a duração máxima foi de 18 minutos. Já com a variação da massa térmica a duração máxima foi de 48 minutos, visto que há uma alteração significativa na duração das fases de funcionamento do frigorífico. Posto isto, sendo os frigoríficos dispositivos já ligados e síncronos com a rede elétrica e tendo em conta a duração de flexibilidade obtida, estes podem ser utilizados como um serviço de reserva de curta duração e resposta imediata.

## 5.2. Trabalhos Futuros

O modelo matemático utilizado nas simulações permitiu caraterizar o comportamento do frigorífico através da modelação da temperatura interna do frigorífico e do estado de funcionamento do compressor. No entanto, esse modelo embora tenha em conta algumas perdas energéticas do frigorífico, não tem em conta as perdas que o sistema pode sofrer provenientes da intervenção do utilizador no sistema (e.g. perdas relativas à abertura da porta do frigorífico). Além disso, sendo um modelo de primeira ordem não tem em consideração regimes transitórios provenientes do funcionamento do frigorífico. Num trabalho futuro, de forma a ter resultados mais próximos da realidade, seria interessante considerar um modelo mais complexo que englobe as caraterísticas em cima referidas.

Para que a flexibilidade energética dos frigoríficos possa ser utilizada num sistema real, seria importante o desenvolvimento de uma plataforma computacional, que facilitasse a análise e a quantificação da flexibilidade em tempo real, através da metodologia desenvolvida nesta dissertação. Adicionalmente, poderá fazer sentido estudar o conceito de flexibilidade associado a outros dispositivos elétricos. Para que no futuro os diversos dispositivos presentes numa habitação, de acordo com as suas características, possam ser utilizados como serviços auxiliares de reserva pelo operador da rede, em prol da utilização de soluções mais sustentáveis. Assim, numa só plataforma poderia ser centralizado o cálculo da flexibilidade de uma habitação contendo os diversos dispositivos. Na mesma lógica, considerando um conjunto de habitações, resultaria na informação do agregado de flexibilidade de uma região que estaria disponível para ser utilizada como serviço auxiliar ao sistema elétrico.

## 5.3. Artigos Publicados

Do trabalho desenvolvido originou a publicação de um artigo científico, nomeadamente:

R. A. Lopes, A. Chambel, J. Neves, D. Aelenei, and J. Martins, “A Literature Review of Methodologies Used to Assess the Energy Flexibility of Buildings,” *Energy Procedia*, vol. 91, pp. 1053–1058, 2016.



## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] European Commission, "Europe 2020: a strategy for smart, sustainable and inclusive growth," 2010.
- [2] International Energy Agency, "World Energy Outlook 2015 - EXECUTIVE SUMMARY," 2015.
- [3] International Energy Agency, "World Energy Outlook - Special Briefing for COP21," 2015.
- [4] Eurostat and European Commission, *Energy, transport and environment indicators*. 2015.
- [5] P. D. Lund, J. Lindgren, J. Mikkola, and J. Salpakari, "Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 785–807, 2015.
- [6] G. Heffner, C. Goldman, B. Kirby, and M. Kintner-Meyer, "Loads Providing Ancillary Services : Review of International Experience," *Lawrence Berkeley Natl. Lab.*, 2007.
- [7] B. Drysdale, J. Wu, and N. Jenkins, "Flexible demand in the GB domestic electricity sector in 2030," *Appl. Energy*, vol. 139, pp. 281–290, Feb. 2015.
- [8] DGGE / IP-3E, *Eficiência energética em equipamentos e sistemas eléctricos no sector residencial*. Lisboa, 2004.
- [9] Instituto Nacional de Estatística, "Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010," Lisboa, 2011.
- [10] G. Niro, D. Salles, M. V. P. Alcântara, and L. C. P. da Silva, "Large-scale control of domestic refrigerators for demand peak reduction in distribution systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 100, pp. 34–42, Jul. 2013.
- [11] Cândido De Figueiredo, *Grande Dicionário da Língua Portuguesa*, 25<sup>a</sup>. 1996.
- [12] D. Six, J. Desmedt, J. Van Bael, and D. Vanhoudt, "Exploring The Flexibility Potential Of Residential Heat Pumps Combined With Thermal Energy Storage For Smart Grids," *21st Int. Conf. Electr. Distrib.*, no. 442, pp. 6–9, 2011.
- [13] M. K. Petersen, K. Edlund, L. H. Hansen, J. Bendtsen, and J. Stoustrup, "A Taxonomy for Modeling Flexibility and a Computationally Efficient Algorithm for Dispatch in Smart Grids," pp. 1152–1158, 2013.
- [14] Eurelectric, "Flexibility and Aggregation - Requirements for their interaction in the market," 2014.

- [15] R. De Coninck and L. Helsen, "Quantification of Flexibility in Buildings by Cost Curves - Methodology and Application," *Appl. Energy*, vol. 162, pp. 653–665, 2015.
- [16] R. D'hulst, W. Labeeuw, B. Beusen, S. Claessens, G. Deconinck, and K. Vanthournout, "Demand response flexibility and flexibility potential of residential smart appliances: Experiences from large pilot test in Belgium," *Appl. Energy*, vol. 155, pp. 79–90, 2015.
- [17] E. Valsomatzis, K. Hose, T. B. Pedersen, and L. Siksnyš, "Measuring and Comparing Energy Flexibilities," *CEUR Workshop Proc.*, vol. 1330, pp. 78–85, 2015.
- [18] B. Dupont, P. Vingerhoets, P. Tant, K. Vanthournout, W. Cardinaels, T. De Rybel, E. Peeters, and R. Belmans, "LINEAR Breakthrough Project: Large-Scale Implementation of Smart Grid Technologies in Distribution Grids," *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur.*, pp. 1–8, 2012.
- [19] T. Nuytten, B. Claessens, K. Paredis, J. Van Bael, and D. Six, "Flexibility of a combined heat and power system with thermal energy storage for district heating," *Appl. Energy*, vol. 104, pp. 583–591, 2013.
- [20] R. De Coninck and L. Helsen, "Bottom-Up Quantification of the Flexibility Potential of Buildings," *13th Conf. Int. Build. Perform. Simul. Assoc. Chambéry, Fr. August 26-28*, pp. 3250–3258, 2013.
- [21] F. Tahersima, P. P. Madsen, and P. Andersen, "An Intuitive Definition of Demand Flexibility in Direct Load Control," *Proc. IEEE Int. Conf. Control Appl.*, pp. 521–526, 2013.
- [22] A. van Stiphout, J. Engels, D. Guldentops, and G. Deconinck, "Quantifying the flexibility of residential electricity demand in 2050: a bottom-up approach," in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, 2015, pp. 1–6.
- [23] F. Oldewurtel, D. Sturzenegger, G. Andersson, M. Morari, and R. S. Smith, "Towards a Standardized Building Assessment for Demand Response," *Proc. IEEE Conf. Decis. Control*, pp. 7083–7088, 2013.
- [24] S. O. Ottesen and A. Tomasgard, "A stochastic model for scheduling energy flexibility in buildings," *Energy*, vol. 88, pp. 364–376, 2015.
- [25] R. Belhomme, R. Cerero, G. Valtorta, and P. Eyrolles, "The ADDRESS project: Developing Active Demand in smart power systems integrating renewables," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–8, 2011.
- [26] "ADDRESS Project - FP7 ENERGY." [Online]. Available: <http://www.addressfp7.org/>. [Accessed: 28-Jan-2016].

- [27] M. Caujolle, L. Glorieux, P. Eyrolles, J. Le Baut, R. Irhly, F.-X. Toledo, R. Belhomme, F. Naso, O. Morozova, G. Valtorta, D. Ectors, P. Kropman, J. Burger, J. M. van der Valk, I. Delgado, and R. González, "ADDRESS - Prototype Field Tests. Test Results.," 2013.
- [28] EnergyVille, "LINEAR Final Report," 2014.
- [29] C. Bornarke and Richard E. Sonntag, *Fundamentals of Thermodynamics*, 7a ed. 2008.
- [30] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 5a ed. 2005.
- [31] E. Kremers, "Modelling and Simulation of Electrical Energy Systems through a Complex Systems Approach using Agent-Based Models," Universidad del Pais Vasco, Escuela Universitaria de Ingeniería de Vitoria, 2012.
- [32] J. M. Belman-Flores, J. M. Barroso-Maldonado, A. P. Rodríguez-Muñoz, and G. Camacho-Vázquez, "Enhancements in domestic refrigeration, approaching a sustainable refrigerator – A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 955–968, 2015.
- [33] J. A. Q. Dias, "Concepção de Instalações Frigoríficas em Expansão Directa versus Sistemas Inundados. Análise Energética das Soluções," Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2012.
- [34] V. A. de J. R. Colaço, "Estudo e desenvolvimento de modelo de dispositivo controlado por temperatura no contexto de eficiência energética. Potencial de aplicação para DSR-SF," Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2014.
- [35] J. Nunes, "Avaliação do desempenho dos sistemas de refrigeração nas indústrias agroalimentares da Beira Interior," Universidade da Beira Interior, 2013.
- [36] M. Stadler, W. Krause, M. Sonnenschein, and U. Vogel, "Modelling and evaluation of control schemes for enhancing load shift of electricity demand for cooling devices," *Environ. Model. Softw.*, vol. 24, no. 2, pp. 285–295, Feb. 2009.